

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษานิพนธ์ของตัวแปรในการตัดที่มีผลกระทบต่อความแข็ง
ของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53 และ SKD 11

นายวิระศักดิ์ เพ็ชรพรหมสอน
นายอิทธิชัย ทองป้อม
นายอิทธิวัฒน์ พงศ์ชินฤทธิ์

รฟ.
7849ก
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 72272
วัน,เดือน,ปี..... 13 มี.ย. 2550

b. 11766530
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A STUDY ON EFFECTS OF MACHINING PARAMETERS
ON HARDNESS OF EDMed DC53 AND SKD11 TOOL
STEELS**



**MR. WEERASAK PETPROMSON
MR. ITTICHAI THONGPONG
MR. ITTINUN PONGCHINRIT**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2006**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปร ในการตัดที่มีผลกระทบต่อความแข็งของ
เหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 และ SKD11
A STUDY ON EFFECTS OF MACHINING PARAMETERS ON
HARDNESS OF EDMed DC53 AND SKD11 TOOL STEELS


นักศึกษา

นายวีระศักดิ์ เพ็ชรพรหมสอน 47015657
นายอิทธิชัย ทองป้อม 47015667
นายอิทธิวัฒน์ พงศ์ชินฤทธิ์ 47015668

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท


(ผศ.ดร.กรรณชัย ก้อยศิริ)


(ดร.อนิรุท ไชยจารุณิข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการตัดที่มีผลกระทบต่อความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 และ SKD11
นักศึกษา	นายวีระศักดิ์ เพ็ชรพรหมสอน รหัสประจำตัว 47015657 นายอิทธิชัย ทองป็อง รหัสประจำตัว 47015667 นายอิทธินันท์ พงศ์ชินฤทธิ์ รหัสประจำตัว 47015668
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ ดร.อนิรุท ไชยงารวมิช

บทคัดย่อ

โครงการฉบับนี้ได้ทำการศึกษาความแข็ง ที่เกิดจากการขึ้นรูปเหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53 และ SKD 11 ที่ผ่านการตัดด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining : EDM) โดยมีตัวแปรในการตัดดังนี้คือ ช่วงเวลาในการจ่ายไฟในการสปาร์ก (ON) ค่าของกระแสไฟที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) และใช้ทองแดงเป็นอิเล็กโทรด ซึ่งก่อนที่จะนำชิ้นทดสอบมาทำการตัด ต้องผ่านกระบวนการขึ้นรูปให้ได้ขนาดตามต้องการ ขั้นตอนนี้ทำให้มีความเค้นตกค้าง ทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนไป ดังนั้นต้องนำชิ้นทดสอบไปอบคลายความเค้นตกค้าง เพื่อให้ได้คุณสมบัติดั้งเดิม แล้วนำชิ้นงานไปสปาร์ก โดยใช้เวลาในการสปาร์กคั้งไว้ที่ 30 นาที จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปวัดค่าความแข็งด้วยวิธี Vickers Micro Hardness Test จากการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของค่า ON และ IP จะส่งผลให้ค่าความแข็งที่ผิวชิ้นงานทดลองเพิ่มขึ้น และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าตัวแปร ON มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง มากกว่าตัวแปร IP ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

Thesis Title A Study on Effect of Machining Parameters on Hardness of EDMed DC53 and SKD11 Tool Steels

Student Mr. Weerasak Petpromson
Mr. Itichai Thongpong
Mr. Ittinun Pongchinrit

Degree Bachelor of Engineering in Industrial Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2006

Thesis Advisor Asst. Prof. Dr.Kannachai Kanlayasiri
Dr.Anirut Chaijaruwanich

ABSTRACT

This project is to investigate the hardness induced by EDM process of DC53 and SKD11 tool steels. The process parameters are electrical discharge pulse (ON) and electrical discharge peak current (IP). Copper is used as electrode. Specimens were machined into the desired shape and the induced residual stress during machining was relieved by annealing. The sparking time was 30 minutes. The Vickers micro hardness tests were performed. The results from graph analysis and analysis of variance (ANOVA) at the confidence of 95% ($\alpha = 0.05$) showed that the hardness near the surface increased with the increasing ON and IP and the effect of electrical discharge pulse was more effective than that of the electrical discharge peak current.

กิตติกรรมประกาศ

การทำปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี กลุ่มผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำแนวทางในการคิดและให้คำแนะนำในการดำเนินการวิจัย ตลอดจนให้คำปรึกษาปัญหาต่างๆ อันก่อให้เกิดประโยชน์ต่องานวิจัยในครั้งนี้ จนทำให้การวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาปฏิญานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการวิจัย รวมถึงให้ความรู้ ความเข้าใจใส่ตลอดระยะเวลาในการทำปฏิญานิพนธ์

ดร. อนิรุท ไชยจางูวณิช อาจารย์ที่ปรึกษาปฏิญานิพนธ์ กลุ่มผู้วิจัยขอขอบพระคุณที่ให้ข้อมูลและคำปรึกษาต่างๆ สำหรับการทำปฏิญานิพนธ์

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง รวมทั้งอาจารย์ทุกท่าน

ขอขอบคุณหนังสือทุกเล่มที่กลุ่มผู้วิจัยใช้ในการศึกษาค้นคว้าข้อมูลต่างๆ ในการทำปฏิญานิพนธ์
สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณผู้ปกครองที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจเสมอมา จนทำให้กลุ่มผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการศึกษาจนถึงวันนี้

นายวิระศักดิ์ เพ็ชรพรหมสอน
นายอิทธิชัย ทองป้อง
นายอิทธินันท์ พงศ์ชินฤทธิ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปาร์ก	4
2.1.1 สภาพที่กระแสเริ่มไหล (Dark Current)	5
2.1.2 การสปาร์กแบบโคโรน่า (Corona Discharge)	5
2.1.3 การสปาร์กแบบโกลว์ (Glow Discharge)	5
2.1.4 การสปาร์กแบบอาร์ค (Arc Discharge)	6
2.2 หลักการของกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม	6
2.2.1 ใส้แรงดันไฟฟ้า	7
2.2.2 การสูญเสียความเป็นฉนวน	7
2.2.3 สปาร์กหลอมละลาย	7
2.2.4 เย็นตัว	7
2.2.5 กลับคืนสู่ความเป็นฉนวน	8
2.2.6 ประโยชน์ของกรรมวิธีอีดีเอ็ม	8
2.2.7 การแบ่งประเภทของกรรมวิธีอีดีเอ็ม (Categories of EDM)	8
2.2.8 อุปกรณ์ของกรรมวิธีอีดีเอ็ม	8
2.3 อิเล็กโทรด	9
2.3.1 คุณสมบัติของอิเล็กโทรดในกรรมวิธีอีดีเอ็ม	9
2.3.2 วัสดุที่ทำอิเล็กโทรด	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 ระบบไดอิเล็กตริก.....	12
2.4.1 หน้าที่ของสาร ไดอิเล็กตริก.....	12
2.4.2 ประเภทของสาร ไดอิเล็กตริก.....	12
2.4.3 คุณสมบัติของสาร ไดอิเล็กตริก.....	13
2.5 ระบบการไหลของไดอิเล็กตริก.....	13
2.5.1 ระบบการไหลของไดอิเล็กตริกในกรรมวิธีอีเอ็ม.....	14
2.5.2 ปัญหาเก๊ส.....	18
2.6 ระบบเซอร์โว (Servo System).....	19
2.6.1 ระบบควบคุมการป้อนอิเล็กโทรดในกรรมวิธีอีเอ็ม.....	19
2.7 การวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Micro Hardness Test).....	19
2.8 การวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดลองโดยใช้หลักการทางสถิติ.....	21
2.8.1 การใช้หลักทางสถิติในการทดลอง.....	21
2.8.2 การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบ.....	21
2.8.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	22
2.8.4 การทดสอบสมมติฐานผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของสองประชากร (μ_a) เมื่อสุ่ม ตัวอย่างไม่เป็นอิสระต่อกัน.....	27
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.1.1 ชิ้นงานทดลอง.....	32
3.1.2 อิเล็กโทรด.....	32
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.2.1 เครื่องอีเอ็ม.....	32
3.2.2 เครื่องขัด.....	33
3.2.3 เครื่องวัดความแข็งชิ้นงาน.....	34
3.2.4 เครื่องอบชุบโลหะ.....	35
3.3 หลักการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	35
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	39
3.4.1 ขั้นตอนการเตรียมการทดลอง.....	39
3.4.2 ขั้นตอนระหว่างการผลิต.....	40
3.4.3 ขั้นตอนหลังการผลิต.....	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ผลของการทดลองที่ได้จากการเก็บค่าความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ.....	43
4.2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	62
4.2.1 การวิเคราะห์การแปรปรวน.....	62
4.2.2 การทดสอบสมมติฐานผลต่างระหว่างค่าความแข็งของวัสดุทดลองทั้ง 2 ชนิด.....	69
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	71
5.2 ข้อเสนอสำหรับงานวิจัยชิ้นอื่น.....	72
หนังสืออ้างอิง	73
ภาคผนวก ก	ผก1
ภาคผนวก ข	ผข1

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2-1 กระบวนการคิสซาร์จ.....	4
รูปที่ 2-2 คุณสมบัติพิเศษแรงดันไฟฟ้า.....	5
รูปที่ 2-3 กระแสไฟฟ้าของการสปาร์ก.....	5
รูปที่ 2-4 ภาพลำดับการสปาร์กในแต่ละครั้ง.....	6
รูปที่ 2-5 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดฮีเอ็ม.....	7
รูปที่ 2-6 หลักการทำงานของระบบฮีเอ็ม.....	9
รูปที่ 2-7 การสะสมของอนุภาคโลหะในช่องว่างเมื่อไม่ใช้ระบบการไหลของไดอิเล็กตริก.....	14
รูปที่ 2-8 อนุภาคโลหะก่อตัวเป็นสะพานตัวนำไฟฟ้า.....	14
รูปที่ 2-9 การไหลของไดอิเล็กตริกแบบฉีด.....	15
รูปที่ 2-10 ไดอิเล็กตริกไหลผ่านรูพูนกราไฟท์ออกมาที่บริเวณช่องว่าง.....	15
รูปที่ 2-11 การไหลของไดอิเล็กตริกแบบคูด.....	16
รูปที่ 2-12 การไหลของไดอิเล็กตริกทางด้านข้าง.....	17
รูปที่ 2-13 การไหลของไดอิเล็กตริกโดยอาศัยการขึ้น-ลงของอิเล็กโตรด.....	17
รูปที่ 2-14 การไหลแบบฉีดพร้อมกับเลื่อนอิเล็กโตรดขึ้น.....	18
รูปที่ 2-15 การเจาะรูอิเล็กโตรดที่ระบายแก๊สที่เกิดขึ้น.....	18
รูปที่ 2-16 ลักษณะรอยกดจากหัวเพชรของ Vickers Micro Hardness Test.....	20
รูปที่ 2-17 กราฟกราฟแฉกแบบปกติแสดงเขตยอมรับ H_0 และแสดงเขตปฏิเสธ H_0 แบบข้างเคียงด้านขวา.....	29
รูปที่ 2-18 กราฟกราฟแฉกแบบปกติแสดงเขตยอมรับ H_0 และแสดงเขตปฏิเสธ H_0 แบบข้างเคียงด้านซ้าย.....	30
รูปที่ 2-19 กราฟกราฟแฉกแบบปกติแสดงเขตยอมรับ H_0 และแสดงเขตปฏิเสธ H_0 แบบสองข้าง.....	31
รูปที่ 3-1 เครื่องอัดฮีเอ็ม.....	33
รูปที่ 3-2 เครื่องขัดผิวชิ้นงาน.....	34
รูปที่ 3-3 เครื่องวัดความแข็งชิ้นงาน.....	34
รูปที่ 3-4 เคาอบไฟฟ้า.....	35
รูปที่ 3-5 แท่งอิเล็กโตรด.....	40
รูปที่ 3-6 รูปชิ้นงานทดลอง.....	41
รูปที่ 4-1 ผลการเก็บค่าความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 และ SKD11 ก่อนผ่านกรรมวิธีการอัดฮีเอ็ม.....	42
รูปที่ 4-2 ค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 125, IP = 50, วัสดุทดลอง DC53.....	47
รูปที่ 4-3 ค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 125, IP = 50, วัสดุทดลอง SKD11.....	47
รูปที่ 4-4 ค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 125, IP = 75, วัสดุทดลอง DC53.....	48
รูปที่ 4-5 ค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 125, IP = 75, วัสดุทดลอง SKD11.....	48
รูปที่ 4-6 ค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 125, IP = 90, วัสดุทดลอง DC53.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4-7 ค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 125, IP = 90, วัสดุทดลอง SKD11.....	49
รูปที่ 4-8 ค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 190, IP = 50, วัสดุทดลอง DC53.....	50
รูปที่ 4-9 ค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 190, IP = 50, วัสดุทดลอง SKD11.....	50
รูปที่ 4-10 ค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 190, IP = 75, วัสดุทดลอง DC53.....	51
รูปที่ 4-11 ค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 190, IP = 75, วัสดุทดลอง SKD11.....	51
รูปที่ 4-12 ค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 190, IP = 90, วัสดุทดลอง DC53.....	52
รูปที่ 4-13 ค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 190, IP = 90, วัสดุทดลอง SKD11.....	52
รูปที่ 4-14 ค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 250, IP = 50, วัสดุทดลอง DC53.....	53
รูปที่ 4-15 ค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 250, IP = 50, วัสดุทดลอง SKD11.....	53
รูปที่ 4-16 ค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 250, IP = 75, วัสดุทดลอง DC53.....	54
รูปที่ 4-17 ค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 250, IP = 75, วัสดุทดลอง SKD11.....	54
รูปที่ 4-18 ค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 250, IP = 90, วัสดุทดลอง DC53.....	55
รูปที่ 4-19 ค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 250, IP = 90, วัสดุทดลอง SKD11.....	55
รูปที่ 4-20 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON คงที่เท่ากับ 125 โดยค่า IP แปรผันที่ 50 , 75, 90, วัสดุทดลอง DC53.....	56
รูปที่ 4-21 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON คงที่เท่ากับ 190 โดยค่า IP แปรผันที่ 50, 75, 90, วัสดุทดลอง DC53.....	56
รูปที่ 4-22 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON คงที่เท่ากับ 250 โดยค่า IP แปรผันที่ 50, 75, 90, วัสดุทดลอง DC53.....	57
รูปที่ 4-23 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ IP คงที่เท่ากับ 50 โดยค่า ON แปรผันที่ 125, 190, 250, วัสดุทดลอง DC53.....	57
รูปที่ 4-24 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ IP คงที่เท่ากับ 75 โดยค่า ON แปรผันที่ 125, 190, 250, วัสดุทดลอง DC53.....	58
รูปที่ 4-25 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ IP คงที่เท่ากับ 90 โดยค่า ON แปรผันที่ 125, 190, 250, วัสดุทดลอง DC53.....	58
รูปที่ 4-26 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON คงที่เท่ากับ 125 โดยค่า IP แปรผันที่ 50, 75, 90, วัสดุทดลอง SKD11.....	59
รูปที่ 4-27 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON คงที่เท่ากับ 190 โดยค่า IP แปรผันที่ 50,75,90, วัสดุทดลอง SKD11.....	59
รูปที่ 4-28 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON คงที่เท่ากับ 250 โดยค่า IP แปรผันที่ 50, 75, 90, วัสดุทดลอง SKD11.....	60

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4-29 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ IP คงที่เท่ากับ 50 โดยค่า ON แปรผันที่ 125, 190, 250, วัสดุทดลอง SKD11.....	60
รูปที่ 4-30 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ IP คงที่เท่ากับ 75 โดยค่า ON แปรผันที่ 125, 190, 250, วัสดุทดลอง SKD11.....	61
รูปที่ 4-31 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ IP คงที่เท่ากับ 90 โดยค่า ON แปรผันที่ 125, 190, 250, วัสดุทดลอง SKD11.....	61
รูปที่ 4-32 ค่าส่วนตกค้างของค่าความแข็งของวัสดุทดลองกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล.....	64
รูปที่ 4-33 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าความแข็งของวัสดุทดลอง.....	65
รูปที่ 4-34 ค่าส่วนตกค้างกับค่าการทำนายค่าความแข็งของวัสดุทดลอง.....	65
รูปที่ 4-35 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานทดลอง (HARDNESS) เปรียบระหว่างวัสดุทดลอง เหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 และ SKD11.....	66
รูปที่ 4-36 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานทดลอง (HARDNESS) โดยค่า ON แปรผันที่ 125, 190 และ 250 μ sec.....	66
รูปที่ 4-37 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานทดลอง (HARDNESS) โดยค่า IP แปรผันที่ 50, 75 และ 90 แอมแปร์.....	67
รูปที่ 4-38 การมีปฏิริยต่อกัน (Interaction) ของค่าความแข็งของชิ้นงานทดลอง (HARDNESS) ระหว่างตัวแปร ON กับ IP.....	68
รูปที่ 4-39 การมีปฏิริยต่อกัน (Interaction) ของค่าความแข็งของชิ้นงานทดลอง (HARDNESS) ระหว่างตัวแปร ON กับ วัสดุทดลอง.....	68
รูปที่ 4-40 การมีปฏิริยต่อกัน (Interaction) ของค่าความแข็งของชิ้นงานทดลอง (HARDNESS) ระหว่างตัวแปร IP กับ วัสดุทดลอง.....	69
รูปที่ 4-41 Output การทดสอบสมมติฐานแบบ (Pair t-test) จากโปรแกรม STATGRAPHICS Plus.....	70
รูปที่ ผก 1 ภาพเครื่องอิตีเอ็มยี่ห้อ Sodick รุ่น AQ35L.....	ผก2
รูปที่ ผก 2 สวิตช์เบรกเกอร์ (Breaker).....	ผก3
รูปที่ ผก 3 เครื่องแปลงไฟฟ้า.....	ผก3
รูปที่ ผก 4 สวิตช์เบรกเกอร์ (Breaker) ด้านหลังเครื่องอิตีเอ็ม.....	ผก4
รูปที่ ผก 5 ปุ่ม เปิด/ปิด ระบบเครื่องอิตีเอ็ม.....	ผก4
รูปที่ ผก 6 หน้าจอแสดงคำสั่งให้กดปุ่ม POWER ON หลังจากบูทระบบเสร็จแล้ว.....	ผก5
รูปที่ ผก 7 หน้าจอแสดงคำสั่งให้กดปุ่ม ENT.....	ผก5
รูปที่ ผก 8 ปุ่มควบคุมค่าๆ ของเครื่องอิตีเอ็ม.....	ผก6
รูปที่ ผก 9 ปุ่มควบคุมความเร็วฟีด (Feed).....	ผก6
รูปที่ ผก 10 การติดตั้งอิเล็กโทรดและชิ้นงาน.....	ผก7

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ผก 11 หน้าจอแสดงการเข้าฟังก์ชัน Appr Face	ผก8
รูปที่ ผก 12 หน้าจอแสดงฟังก์ชัน Appr Face	ผก8
รูปที่ ผก 13 หน้าจอแสดงฟังก์ชัน Move	ผก9
รูปที่ ผก 14 หน้าจอสำหรับเขียน G-Code ในฟังก์ชัน Edit	ผก10
รูปที่ ผก 15 หน้าจอแสดงเงื่อนไขของการตัด	ผก11
รูปที่ ผก 16 หน้าจอแสดงข้อมูลของการตัด	ผก11
รูปที่ ผก 17 แผงควบคุมทางด้านหน้าเครื่อง	ผก12



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 แสดงการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	25
ตารางที่ 3-1 ตัวแปรที่สภาวะคงที่โดยกำหนดค่าคงที่ตลอดการทดลอง.....	36
ตารางที่ 3-2 ระดับของพารามิเตอร์ในการทดลอง.....	37
ตารางที่ 3-3 การออกแบบและลำดับการทดลองของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53.....	37
ตารางที่ 3-4 การออกแบบและลำดับการทดลองของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11.....	38
ตารางที่ 4-1 ผลการเก็บค่าความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 และ SKD11 ก่อนผ่านกรรมวิธีการฮีตเย็น.....	42
ตารางที่ 4-2 ผลการเก็บค่าความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 ก่อนผ่านกรรมวิธีการฮีตเย็น.....	43
ตารางที่ 4-3 ผลการเก็บค่าความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ก่อนผ่านกรรมวิธีการฮีตเย็น.....	45
ตารางที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าคุณสมบัติความแข็งของวัสดุทดลองจากตารางANOVA.....	63
ตารางที่ ผข 1 ใบแสดงส่วนผสมเหล็กกล้า DC53.....	ผข2
ตารางที่ ผข 2 ใบแสดงส่วนผสมเหล็กกล้า SKD11.....	ผข3
ตารางที่ ผข 3 ใบแสดงส่วนผสมอิเล็กทรอนิกส์โครงทองแดง.....	ผข4

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของงานวิจัย

อุตสาหกรรมต่างๆ ทั้งในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ อุตสาหกรรมการผลิตพลาสติก อุตสาหกรรมไฟฟ้า และอื่นๆ อีกมากมาย ล้วนเป็นการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเหมือนกันเป็นจำนวนมาก ซึ่งในการผลิตชิ้นส่วนโลหะและผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณมากๆ ให้ได้ขนาดที่แน่นอน และมีคุณภาพนั้น ต้องอาศัยการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ทั้งสิ้นคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้นั้นจึงขึ้นอยู่กับคุณภาพของแม่พิมพ์ ดังนั้นแม่พิมพ์จึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญ ในการขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะ หรือ พลาสติก อาทิเช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนคอมพิวเตอร์ ชิ้นส่วนรถยนต์ และรถจักรยานยนต์

หากขึ้นคอนการสร้างแม่พิมพ์ออกมาไม่มีคุณภาพแล้ว ชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นก็จะไม่มีคุณภาพตามที่ต้องการเช่นกัน เพราะเนื่องจากวัสดุที่จะนำมาตัดขึ้นรูปนั้นมีความแข็งใกล้เคียงกับคมตัดของแม่พิมพ์ ทำให้เกิดการสึกหรอของมีดตัดอย่างรวดเร็วในขณะที่ทำการตัด ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องใช้กระบวนการอื่นเข้ามาทำการขึ้นรูป ซึ่งกรรมวิธีการอีดีเอ็ม เป็นวิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้กับการตัดวัสดุที่มีความแข็งสูง โดยเครื่องอีดีเอ็ม จะขึ้นรูปวัสดุโดยการทำให้เกิดความร้อนที่สูงมาก จนวัสดุเกิดการหลอมละลายในตำแหน่งที่เราต้องการ ความร้อนที่ระหว่างการขึ้นรูป อาจมีผลต่อการเปลี่ยนจุดโครงสร้างของวัสดุ ณ ตรงบริเวณทำการตัดหรืออาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานนั้น ในการผลิตแม่พิมพ์ที่คืนั้น จำเป็นต้องใช้เครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพสูงในการสร้าง ซึ่งก็คือ เครื่องตัดด้วยประจุไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining) เป็นเครื่องจักรที่มีบทบาทอย่างมากในอุตสาหกรรมการสร้างแม่พิมพ์ เป็นเครื่องจักรที่ใช้สำหรับการตัดเจาะ โลหะ โดยอาศัยพลังงานจากการคายประจุ (Discharge) ทางไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นบนช่องว่างระหว่างชิ้นงานและอิเล็กโทรด ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวน โดยที่ชิ้นงานและอิเล็กโทรดจะไม่มีสัมผัสกัน โดยจะมีกลไกการควบคุมการปล่อยกระแสออกมาเป็นช่วงๆ เพื่อไม่ให้เกิดการสปาร์กแบบอาร์ค ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่เหมาะสมกับการขึ้นรูป เป็นกลไกที่ควบคุมการปล่อยกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการสปาร์กกับชิ้นงาน ได้แก่ ช่วงเวลาการหยุดสปาร์ก ช่วงเวลาการสปาร์ก ปัจจัยที่กล่าวมานี้จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของงานที่ผ่านกระบวนการตัดด้วยไฟฟ้า ฉะนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจในการศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อความแข็ง เพื่อที่จะให้เป็นแนวทางในการเลือกใช้ ช่วงเวลาหยุดการสปาร์ก ช่วงเวลาการสปาร์ก ให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในการตัดด้วยเครื่องอีดีเอ็ม กับการเปลี่ยนแปลงความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 และ DC53 หลังจากถูกขึ้นรูปโดยกรรมวิธีการอีดีเอ็ม

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกรรมวิธีการฮีตซีเอ็ม ที่มีสาร ไดอิเล็กทริกเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและใช้เฉพาะอิเล็กโทรดทองแดงในการขึ้นรูป
2. ทำการทดสอบเฉพาะความแข็งของชิ้นงานด้วยวิธี Vickers Micro Hardness Test
3. วิเคราะห์ผลความแข็งที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากกรรมวิธีการฮีตซีเอ็ม
4. ศึกษาเฉพาะเหล็กเครื่องมือ DC53 และ SKD11 ที่ผ่านกระบวนการฮีตซีเอ็ม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถควบคุมคุณสมบัติเชิงกลในด้านของความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 และ DC53 ที่ต้องผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยเครื่องฮีตซีเอ็ม
2. สามารถนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปใช้ในการสร้างแม่พิมพ์ต่างๆ ที่ต้องการคุณสมบัติเชิงกลในด้านความแข็ง ให้ทนทานและมีความเหมาะสมมากขึ้น



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การทำการศึกษาเพื่อให้ได้คำตอบที่ตรงความต้องการได้นั้น จำเป็นต้องมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมากมาย ดังนั้นจึงมีทฤษฎีที่ทำการศึกษามีดังนี้

1. ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปาร์ก
2. หลักการของกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม
3. อิเล็กโทรด (Electrode)
4. ระบบไดอิเล็กตริก (Dielectric System)
5. ระบบการไหลของไดอิเล็กตริก (Flushing)
6. ระบบเซอร์โว (Servo System)
7. Vickers Hardness Test
8. การวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดลองโดยใช้หลักการทางสถิติ

กรรมวิธี Electrical Discharge Machining เป็นประเภทหนึ่งของกระบวนการเทคโนโลยีแยกอนุภาควัสดุโดยไม่ใช้วิธีกล (Non-Mechanical Means) โดยกระบวนการแยกอนุภาคโดยไม่ใช้วิธีกล แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท

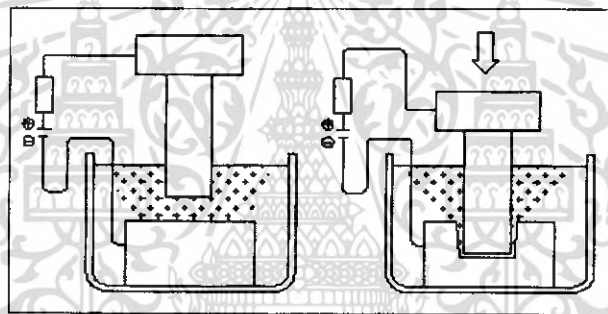
1. วิธีทางความร้อน (Thermal)
2. วิธีทางเคมี (Chemical)
3. วิธีเคมีไฟฟ้า (Electrochemical)

อีดีเอ็ม คือกระบวนการแยกอนุภาควัสดุโดยวิธีความร้อน ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจากการสปาร์กทางไฟฟ้า อนุภาควัสดุที่ถูกแยกออกมาจะอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส

การกัดเซาะไฟฟ้า (Electro Erosion) เป็นคำที่ใช้ครอบคลุมทุกกระบวนการที่แยกอนุภาควัสดุที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านประจุไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดที่อยู่ภายใต้ของเหลวไดอิเล็กตริก หลักการทางฟิสิกส์ที่รู้จักกันมานานกว่า 100 ปีแล้ว ในปีค.ศ. 1733-1809 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ชื่อ โจเซฟ พริสทลีย์ (Joseph Priestley) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับผลของการกัดเซาะเนื่องการปล่อยประจุไฟฟ้า จากการทดลองยังไม่สามารถนำไปใช้ให้เป็นประโยชน์ในงานโลหะได้ จนกระทั่ง Lazarenk ได้ทำการทดลองเป็นผลสำเร็จในระหว่างสงครามโลกครั้งที่สอง โดยใช้ประโยชน์ของอุปกรณ์สวิตซ์ไฟฟ้ามาเป็นแนวทางในการพัฒนา

พลังความร้อนที่เกิดจากการปล่อยประจุไฟฟ้าออกมา จะหลอมละลายพื้นผิวของอิเล็กโทรดและชิ้นงานที่บริเวณช่องแคบของการปล่อยประจุไฟฟ้า โลหะหลอมเหลวจะโดนแรงดันขับออกมา ในขณะที่พลังงานที่จัดให้ถูกขัดจังหวะหรือถูกตัด ความดันในบริเวณเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่หลอมเหลวออกมา และยังขับอนุภาคของแข็งออกมาด้วยโดยวิธีกระแทกทางกล

กระบวนการปล่อยประจุไฟฟ้า (Discharge Process) โดยหลักการของการกักเก็บประจุไฟฟ้าในฉนวน และอิเล็กโทรดถูกนำมาวางไว้ในตำแหน่งที่พร้อมจะทำงานแต่ไม่สัมผัสกัน กระบวนการทั้งหมดจะเกิดในของเหลวที่เป็นฉนวนให้กับฉนวนและอิเล็กโทรด ฉนวนและอิเล็กโทรดถูกต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้านี้จะถูกตัดหรือขัดจังหวะด้วยสวิตช์เปิด เมื่อสวิตช์ปิด ศักย์ไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดกับฉนวน ซึ่งเป็นการสร้างสนามไฟฟ้าระหว่างแอโนดกับแคโทดเองจากตัวกลางไดอิเล็กตริกเป็นฉนวน จึงไม่มีกระแสไหลในคอนเริ่มต้นจากระบบความถี่ของเครื่องจักรทำให้อิเล็กโทรดและฉนวนเคลื่อนเข้าหากัน ดังนั้นจึงเกิดปรากฏการณ์ที่จุดที่มีสนามไฟฟ้าสูงสุด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การปล่อยประจุไฟฟ้า กระบวนการนี้กระแสไฟฟ้าแปรผันเป็นความร้อน ทำให้พื้นผิวรอบๆ เส้นทางที่ปล่อยประจุไฟฟ้ามืดลงขึ้นสูง 8000 องศาเซลเซียส ถึง 12000 องศาเซลเซียส ถ้ากระแสที่ไหลอยู่ถูกขัดจังหวะให้หยุดโดยการปิดสวิตช์ เส้นทางสปาร์กจะยุบพังลง การใช้สวิตช์ให้หยุดจ่ายพลังงานจะเป็นสาเหตุทำให้ความดันที่บริเวณเส้นทางที่ปล่อยประจุไฟฟ้าลดลงอย่างทันทีทันใด มีผลทำให้ไอระเหยไหลเกิด การแตกกระจายเป็นไอ หลุดออกมาจากโลหะหลอมเหลว และของแข็งที่ความลึกแน่นอน จึงเกิดเป็นหลุมบนพื้นผิวของการกักเก็บประจุไฟฟ้าของวัสดุ

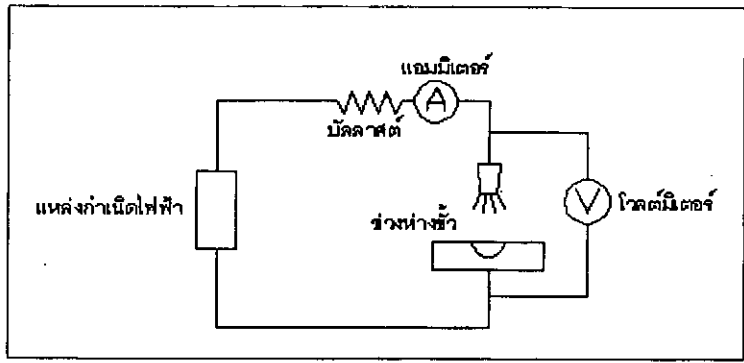


รูปที่ 2-1 กระบวนการดีสชาร์จ

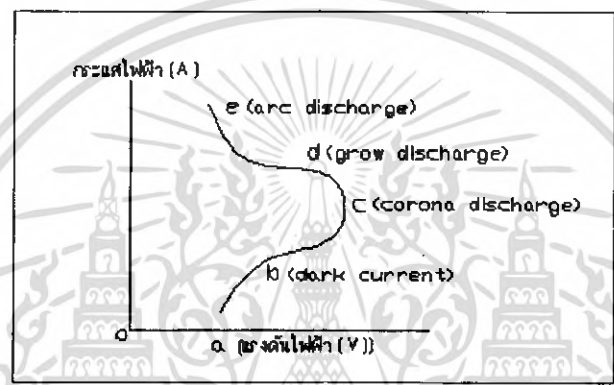
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปาร์ก

ปรากฏการณ์การสปาร์กเป็นชื่อโดยรวมของการสปาร์กต่างๆ ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าประเภท ของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซตั้งอยู่ จนให้ฉนวนไฟฟ้าเหล่านี้สูญเสียความเป็นฉนวน (Dielectric Breakdown) และเกิดมีกระแสไหลอย่างรุนแรง

ดังนั้นปรากฏการณ์ดังกล่าว จึงหมายถึง การฝืนบังคับทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวกลางที่โดยปกติกระแสจะไหลผ่านได้ยาก และเมื่อถึงเวลาที่การฝืนบังคับนี้ถึงขีดจำกัด ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ไหลขึ้นมาอย่างกะทันหัน การนำเอาหลักการสปาร์กมาประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ หลอดฟลูออเรสเซนต์ การเชื่อมแบบอาร์ค การขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์ก เครื่องอีดีเอ็ม



รูปที่ 2-2 คุณสมบัติพิเศษแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2-3 กระแสไฟฟ้าของการสปาร์ก

2.1.1 สภาพที่กระแสเริ่มไหล (Dark Current)

ถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า หรือ ลดช่องว่างระหว่างสปาร์กลงมาเรื่อยๆ เมื่อถึงจุดหนึ่งอากาศจะรวมตัวเป็นประจุไฟฟ้า และอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุเป็นลบจะถูกดูดจากฝั่งขั้วลบไปยังขั้วบวก ซึ่งในช่วงเวลาระยะนี้จะมีกระแสไหลมากประมาณ 10^{-8} - 10^{-11} แอมแปร์ สภาพเช่นนี้มีชื่อเรียกว่า สภาพกระแสเริ่มไหล

2.1.2 การสปาร์กแบบโคโรน่า (Corona Discharge)

ถ้าเพิ่มแรงดันหรือลดช่องว่างระหว่างผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าบางส่วนที่เกิดสนามไฟฟ้าจนมากเกินกว่าปกติจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน เราเรียกสภาพนี้ว่าการสปาร์กแบบโคโรน่า ซึ่งเป็นการสปาร์กที่ขาดเสถียรภาพอย่างมาก

2.1.3 การสปาร์กแบบโกลว์ (Glow Discharge)

บริเวณที่เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนแล้วนั้นอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบจะไหลในส่วนนี้มากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้กระแสไฟฟ้ามีขนาดใหญ่อขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยสภาพการสปาร์กที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก เช่นนี้ เรียกว่า การสปาร์กแบบโกลว์

2.1.4 การสปาร์กแบบอาร์ค (Arc Discharge)

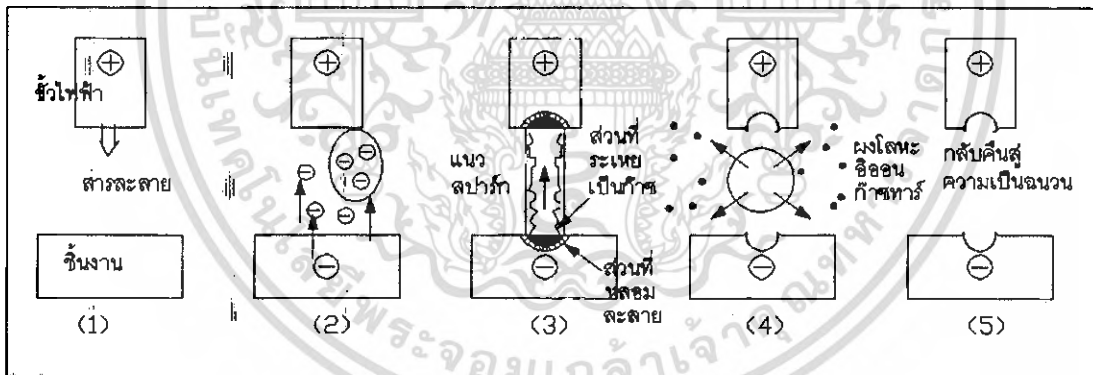
หลังจากที่ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ระหว่างขั้วถูกปลดปล่อยออกมา และการสปาร์กแบบโกลว์ได้มีขนาดกระแสไฟฟ้าค่าสูงสุดแล้ว การสปาร์กจะเข้าสู่ขั้นคอนสแตนต์ สภาพการสปาร์ก เช่นนี้จะเกิดขึ้นในลักษณะที่ควบคุมไม่ได้ ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่เหมาะกับการขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์ก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมพลังงานหรือระยะก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะการสปาร์กแบบอาร์คนี้

การสปาร์กที่เป็นประกายไฟ โดยทั่วไปแล้วนั้นเป็นการสปาร์กซึ่งเกิดขึ้นทุกชั้นตอน ตั้งแต่สภาพที่กระแสเริ่มไหล จนถึงสภาวะสปาร์กแบบการอาร์ค ภายในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก

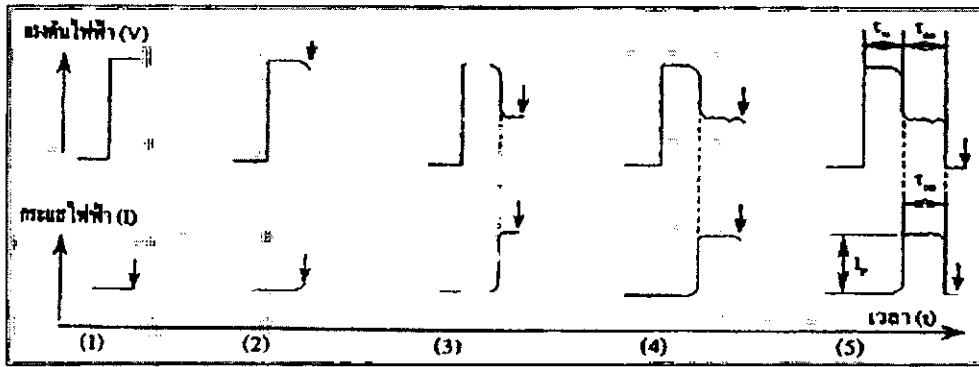
2.2 หลักการของกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม

กรรมวิธีการขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม ในทางปฏิบัติจะทำงานภายในสารละลายไดอิเล็กทริก โดยใช้ทองแดง ทองเหลือง กราไฟต์ เป็นขั้วไฟฟ้าและวัสดุที่นำมาขึ้นรูปได้นั้น จะต้องไม่มีส่วนเกี่ยวกับความแข็งเพียงแต่ต้องเป็นวัสดุที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าจะไม่ปล่อยให้กระแสไหลอย่างต่อเนื่องเหมือนกับการเชื่อมแต่จะใช้วิธีการเปิด/ปิด กระแสไฟฟ้าเป็นช่วงจังหวะ เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนจากการสปาร์กหลอมละลายวัสดุมากเกินไปจนเสียรูปทรง เครื่องอีดีเอ็ม อาศัยการใช้พลังงานระดับสูงซึ่งปลดปล่อยออกมาในช่วงสั้นมาก ดังนั้นปัญหาที่สำคัญมาก คือทำอย่างไรจะทำให้เกิดการ สปาร์กที่เป็นประกายไฟอย่างมีเสถียรภาพและมีประสิทธิภาพสูง

ในการใช้งานจะใช้ระบบ NC (Numerical Control) ควบคุมให้เกิดการสปาร์กหลายแสนครั้งใน 1 วินาที สภาพของพัลส์ (Pulse) แต่ละลูกของการสปาร์กจะเป็นดังรูป 2-4 และรูป 2-5



รูปที่ 2-4 ภาพลำดับการสปาร์กในแต่ละครั้ง



รูปที่ 2-5 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม

2.2.1 โต้แรงดันไฟฟ้า

เริ่มด้วยการใส่แรงดันไฟฟ้า (ประมาณ 60–280 โวลต์) ที่ระหว่างชิ้นงานกับขั้วไฟฟ้า (เรียกว่าระหว่างขั้ว) ซึ่งแรงดันไฟฟ้าใช้โหลด (No-load Voltage) ในสภาพเช่นนี้ระหว่างขั้วยังรักษาความต้านทานระหว่างขั้วให้มีค่าสูงเพื่อลดระยะระหว่างขั้ว และเป็นการระบายความร้อนของขั้ว ซึ่งการลดช่องว่างของขั้วไฟฟ้าที่เกิดการสปาร์กให้แคบลงจะส่งผลคือ ทำให้ชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปมีความละเอียดสูง

2.2.2 การสูญเสียความเป็นฉนวน

เมื่อช่วงระยะระหว่างขั้วใกล้กันเรื่อยๆ จนถึงระยะหนึ่ง (ระยะทางเป็นไมโครเมตร) สารละลายจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนอันเนื่องประจุลบจะถูกดึงไปอีกฝั่งที่เป็นบวก คือ เริ่มมีกระแสไหล

2.2.3 สปาร์กทอมนละลาย

เมื่อเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนขึ้นแล้ว อิเล็กตรอนที่เป็นประจุลบจะเริ่มไหลเป็นจำนวนมากอย่างรุนแรง ซึ่งก็คือการสปาร์กนั่นเอง บริเวณส่วนที่เกิดการสปาร์กขึ้นนี้จะมีกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงมากไหลในช่วงระยะเวลาสั้น ในการขึ้นรูปชิ้นงานนั้นจะมีกระแสตั้งแต่ 0.1 แอมแปร์ ไปจนถึงหลายร้อยแอมแปร์ พลังงานที่ถูกปล่อยออกมาในช่วงนี้จะทำให้บริเวณที่เกิดการสปาร์กมีอุณหภูมิสูงมากขึ้นมา (3,000 องศาเซลเซียสขึ้นไป) จนบางส่วนของชิ้นงานถูกหลอมละลาย นอกจากนั้นแล้วสารละลายบริเวณที่เกิดการสปาร์กก็จะถูกความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้กลายเป็นก๊าซไป และเกิดความดันที่สูงมากเป็นบางส่วน

เมื่อการสปาร์กเริ่มขึ้น เนื่องจากว่ามีฉนวน (สารละลาย) อยู่ระหว่างขั้วจึงทำให้แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วต่ำลง $E = IR$ (ตามกฎของโอห์ม) แรงดันไฟฟ้าในช่วงนี้เรียกว่าแรงดันไฟฟ้าสปาร์ก (Discharge)

2.2.4 เป็นตัว

ความดันที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้ส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานหลุดกระเด็นไป ซึ่งเมื่อถูกสารละลายรอบข้างดูดความร้อนออกไปก็จะเริ่มออกไปก็เริ่มเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วกลายเป็นเศษผงชิ้นเล็กๆ ในช่วงที่เกิดการ

สปาร์กอยู่นั้นกระแสไฟฟ้าจะไหลอยู่ในระดับค่าหนึ่ง แต่ทว่าเมื่อพลังงานที่สะสมอยู่ในระหว่างนั้นถูกปลดปล่อยออกมาแรงดันไฟฟ้าจะต่ำลงอย่างรวดเร็ว

2.2.5 กลับรินสู่ความเป็นฉนวน

หลังจากที่การสปาร์กหนึ่งครั้งได้จบลงกระแสไฟฟ้าจะกลับกลายเป็นศูนย์ และจะรองจนกว่าสารละลายจะกลับคืนสู่ความเป็นฉนวนโดยไม่มีแรงดันไฟฟ้าเข้าไป การรอในช่วงนี้จะช่วยป้องกันการเกิด สปาร์กแบบผิดปกติ เช่น การสปาร์กซ้ำหรือสปาร์กเป็นบางจุดอันเนื่องจากการสะสมหรือทับถมจับตัวกันของอิเล็กตรอนที่ตกค้างระหว่างขั้วหรือเศษผงที่เกิดจากการสปาร์ก ภายหลังจากที่กลับคืนสู่ความเป็นฉนวนแล้วก็จะทำการสปาร์กเช่นเดิมอีก โดยเริ่มต้นที่ 1 ใหม่

2.2.6 ประโยชน์ของกรรมวิธีอีดีเอ็ม

1. ความสามารถในการแปรรูปโลหะแข็งหรือโลหะผสม ซึ่งไม่สามารถทำได้โดยวิธีธรรมดา กรรมวิธีอีดีเอ็มจึงมีบทบาทสำคัญในการทำแม่พิมพ์ และเครื่องมือที่ทำจากโลหะแข็ง ทั้งสะเดนคาร์ไบด์ สเตล-ไลท์
2. ความสามารถในการผลิตชิ้นรูปร่างใดๆก็ได้ เนื่องจากการกัดเนื้อโลหะอาศัยการสปาร์ก จึงไม่ต้องการความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน นอกจากอิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลงมาในชิ้นงานเท่านั้น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะแปรรูปโลหะรูปร่างใดๆ โดยใช้เพียงหนึ่งอิเล็กโทรด
3. พื้นผิวจากกรรมวิธีอีดีเอ็ม มีลักษณะเป็นหลุมเป็นจำนวนมาก จึงช่วยให้สามารถเก็บรักษาน้ำมันหล่อลื่นได้ดีจึงช่วยลดปัญหาเกี่ยวกับการหล่อลื่นได้
4. ในระหว่างทำการแปรรูปชิ้นงานจะไม่มี การเปลี่ยนรูปร่าง เนื่องจากไม่มีแรงจากการสัมผัสของอิเล็กโทรดหรือไม่มีแรงทางกล ทำให้สามารถแปรรูปชิ้นงานที่บอบบางหรือเปราะได้
5. แม้กรรมวิธีอีดีเอ็มจะมีผลกระทบของความร้อน แต่เป็นผลกระทบเฉพาะที่ไม่ได้มีผลกระทบต่อวัสดุ

2.2.7 การแบ่งประเภทของกรรมวิธีอีดีเอ็ม (Categories of EDM)

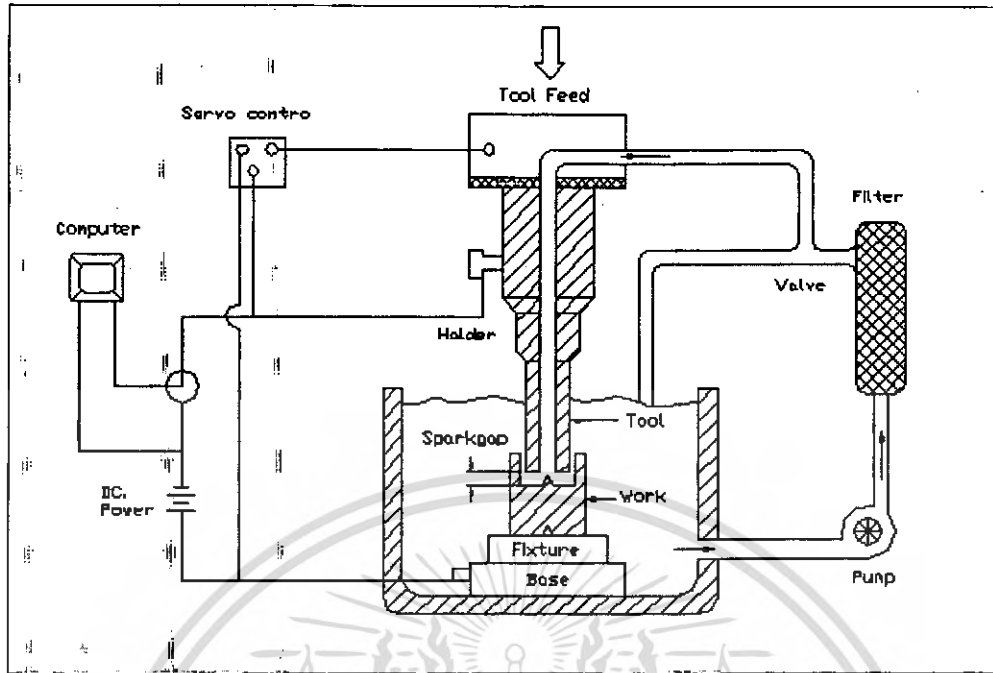
การแปรรูปโลหะ โดยอาศัยการสปาร์กสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

1. การสร้างแม่พิมพ์ (Sinking by EDM)
2. การตัด (Cutting by EDM)
3. การเจียรระไน (Grinding by EDM)

2.2.8 อุปกรณ์ของกรรมวิธีอีดีเอ็ม

กรรมวิธีอีดีเอ็ม จะเกี่ยวข้องกับการใช้ความร้อนที่มีความเข้มสูง ทำให้โลหะชิ้นงานหลอมละลายหรือกลายเป็นไอเฉพาะที่ จะมีอุปกรณ์ประกอบดังนี้

1. แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply)
2. ระบบไดอิเล็กตริก (Dielectric System)
3. อิเล็กโทรด (Electrodes)
4. ระบบเซอร์โว (Servosystem)



รูปที่ 2-6 หลักการทำงานของระบบอีดีเอ็ม

1. แหล่งจ่ายไฟทำหน้าที่ผลิตพลังงานดีสชาร์จเพื่อใช้ในการแยกอนุภาคโลหะ
2. ระบบไดอิเล็กตริก ทำหน้าที่เป็นฉนวน พัดพาเศษอนุภาคโลหะและระบายความร้อนที่เกิดขึ้น
3. อิเล็กโทรด ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างแบบให้กับชิ้นงานหรือกัดเศษโลหะงาน
4. ระบบเซอร์โว ทำการควบคุมการป้อนอิเล็กโทรดเพื่อรักษาระยะช่องว่างของดีสชาร์จให้คงที่ ดังนั้นกำลังงานเฉลี่ยจะลดลงโดยตัวประกอบช่วงเวลาประวิง และสัมพันธ์กับการเกิดดีสชาร์จ และกำลังงานเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นกับตัวประกอบหน้าที่กระแสพัลส์ กระแสเฉลี่ยจะลดลงโดยตัวประกอบหน้าที่ช่วงเวลาประวิง

2.3 อิเล็กโทรด (Electrode)

อิเล็กโทรดในกรรมวิธีอีดีเอ็ม จะใช้กำหนดรูปร่างของชิ้นงานหรือรูที่ต้องการเจาะ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาส่วนประกอบของอิเล็กโทรดและชนิดของวัสดุที่ใช้ ประสิทธิภาพค่าใช้จ่ายในการทำอิเล็กโทรดจะประมาณเท่ากับหรือมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ของค่าใช้จ่ายในการแปรรูปทั้งหมด จะเห็นว่าการเลือกจำนวนอิเล็กโทรดที่ใช้งานมีความสำคัญมาก

2.3.1 คุณสมบัติของอิเล็กโทรดในกรรมวิธีอีดีเอ็ม

1. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี
2. เป็นตัวนำความร้อนที่ดี
3. มีจุดหลอมละลายและมีจุดเดือดสูง
4. ค่อนข้างการกัดเศษจากไฟฟ้าหรือการสึกหรอต่ำ

5. มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ
6. มีความสามารถทำงานได้ดี ราคาควรจะประหยัด และความหนาแน่นต่ำ ทำให้น้ำหนักเบาด้วย

2.3.2 วัสดุที่ทำอิเล็กทรอนิกส์

1. ทองแดง (Electrolytic Copper)

ความหนาแน่น	8.9 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดเดือด	1083 องศาเซลเซียส
ความต้านทานไฟฟ้า	0.0167 โอห์ม ตารางมิลลิเมตร/เมตร

ข้อดี ทองแดงสามารถใช้งานทั้งประเภทงานกัดหยาบและงานกัดละเอียด ให้อัตราการกัดเนื้อ โลหะสูง แต่การสึกหรอต่ำ

ข้อเสีย มีน้ำหนัก การขยายตัวทางความร้อนสูง รูปทรงไม่เสถียรเมื่อมีขนาดบาง การผลิต การสร้างอิเล็กทรอนิกส์ อาจจะใช้การขึ้นรูปโดยวิธี Stamping และ Coining ทองแดงสามารถแปรรูปได้โดยการขึ้นรูปด้วยการกลึงหรือขึ้นรูปด้วยการการกัด เพื่อที่หลีกเลี่ยงรอยจากมิดคิงหรือมิดกัด จะต้องมีการหล่อเย็นด้วยน้ำมันหล่อเย็นชนิดพิเศษ หรือ Fat oil เปรอร์เซนต์ ผสมกับ Petroleum เปรอร์เซนต์ การเจียรไนทองแดง จะใช้โบเจียรไนคือ

สารขัดถู	: คาร์บอนัม (Carborundum)
เกรน	: 46 ถึง 80 ตามผิวสำเร็จที่ต้องการ
โครงสร้าง	: ความแข็ง H-K, รูพรุน 13 -15
ความเร็วรอบ	: 30 เมตร/วินาที
สิ่งจำเป็น	: มีการหล่อเย็นหรือใช้น้ำมันหล่อเย็น

2. ทองแดงผสมทั้งสะเคน

ความหนาแน่น	15-18 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดเดือด	2,500 องศาเซลเซียส
ความต้านทานไฟฟ้า	0.045-0.055 โอห์ม-ตารางมิลลิเมตร/เมตร

ทองแดงผสมทั้งสะเคนมีโครงสร้างเท่ากันทุกทิศทาง อัตราส่วนผสมของทั้งสองสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้ ส่วนผสมของทั้งสะเคนอยู่ระหว่าง 50 เปรอร์เซนต์ ถึง 80 เปรอร์เซนต์ ทองแดงอยู่ระหว่าง 50 เปรอร์เซนต์ ถึง 20 เปรอร์เซนต์ ถ้าโลหะมีทั้งสะเคนผสมอยู่มากจะทำให้การแปรรูปยากกว่าโลหะที่มีทั้งสะเคนผสมอยู่น้อย แต่ในการทำเป็นอิเล็กทรอนิกส์ การสึกหรอจะต่ำกว่า

ข้อดี คุณภาพผิวงานดี มีความต้านทานการกัดเซาะ และมีเสถียรภาพทางความร้อน อัตราการกัดเนื้อโลหะสูง

ข้อเสีย ราคาแพง, ขนาดจำกัด, กระบวนการ จะยากกว่าทองแดง

การผลิต การทำอิเล็กทรอนิกส์ใช้วิธีการธรรมดา คือ การกลึง การเจียรระโน

การกลึง

มีดกลึง	คาร์ไบด์	เหล็กเครื่องมือ
ความเร็วตัด	60-100 เมตร/นาที	12-20 เมตร/นาที
มุมคายหลบ	6-8 องศา	8-10 องศา
มุมหลบ	4-6 องศา	4-6 องศา

การเจียรระโน

สารขัดถู	:	คาร์บอนรันคัมเขียว (Green Carborundum)
เกรน	:	60
ความแข็ง	:	J
โครงสร้าง	:	8

การใช้งาน ทองแดงผสมทั้งสแตนจะใช้งานดังต่อไปนี้

- การแปรรูปโลหะทั้งสะเตนคาร์ไบด์
- การเจาะรูที่มีความลึก
- งานที่มีรายละเอียดสูง
- งานที่มีมุมขอบแหลม
- งานที่ต้องการปริมาณมาก ชิ้นส่วนเล็ก

3. อลูมิเนียมผสม (Aluminium Alloys)

เมื่อแปรรูปชิ้นงานขนาดใหญ่ และเป็นสามมิติ ไม่ต้องการความเรียบของผิว จะใช้อลูมิเนียมผสมชื่อ ซิลูมิน (Silumin) เป็นอิเล็กทรอนิกส์ โลหะชนิดนี้ประกอบด้วย อลูมิเนียม 85 เปอร์เซ็นต์, ซิลิกอน 11 เปอร์เซ็นต์, แมงกานีส 0.4-0.6 เปอร์เซ็นต์, สังกะสี 1 เปอร์เซ็นต์, โทเทเนียม 1 เปอร์เซ็นต์, แมงกานีส, เหล็ก, ทองแดง 1 เปอร์เซ็นต์ ข้อดี ซิลูมินสามารถที่จะหล่อได้ง่าย เพื่อหลีกเลี่ยงรูพรุนผนังไม่ควรจะหนามาก (ประมาณ 10-15 มิลลิเมตร) การหัดตัวประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ และสามารถชดเชยด้วยการขึ้นรูปเย็น (Cold-Forming) ก่อนการอบอ่อน กระทำให้ความร้อนอิเล็กทรอนิกส์ 540 องศาเซลเซียส ผสมด้วยให้เย็นตัวในน้ำ ใช้ระบบจับเศษโลหะแบบฉีด และใช้ความดันต่ำ

ทองเหลือง (Brass)

ในทางปฏิบัติจะไม่ใช้ทองเหลืองเป็นอิเล็กทรอนิกส์ เพราะมีการสึกหรอสูง แต่ลักษณะเด่นที่รับจากทองเหลืองคือใช้กับการแปรรูปโทเทเนียมผสม

เหล็ก (Steel)

เหล็กสามารถใช้เป็นอิเล็กทรอนิกส์ได้ แต่ประสิทธิภาพจะต่ำกว่าทองแดงและกราไฟท์ สิ่งสำคัญของกรรมวิธี EDM บนเหล็ก จะได้เส้นแยกของแบบหล่อพลาสติก และแบบหล่อแม่พิมพ์ ซึ่งส่วนบนของแบบหล่อหรือแม่พิมพ์ ก็คือ อิเล็กทรอนิกส์

2.4 ระบบไดอิเล็กตริก (Dielectric System)

ระบบไดอิเล็กตริกประกอบด้วย สารไดอิเล็กตริก ท่อส่ง ปีม เครื่องกรอง และถังบรรจุสารไดอิเล็กตริก สารไดอิเล็กตริกมีหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้กันมากคือน้ำมันไฮโดรคาร์บอน (น้ำหนัก 30-50) น้ำมันซิลิกอน และน้ำ กำจัดไอออน น้ำกำจัดไอออนจะใช้น้ำไม่มาก แม้ว่าจะมีอัตราการกัดเนื้อโลหะสูง และมีความสามารถหล่อเย็น แต่การสึกหรอของอิเล็กโทรดในการเจาะรู เมื่อทำงานเสร็จต้องตัดปลายลวดออกแล้วจึงเริ่มเจาะรูใหม่ได้ การใช้น้ำกำจัดไอออนใช้มากในกรรมวิธีของ Wire-EDM

2.4.1 หน้าที่ของสารไดอิเล็กตริก สารไดอิเล็กตริกจะมีหน้าที่ดังนี้

1. ฉนวน (Insulation) จุดประสงค์หลักของสารไดอิเล็กตริกคือทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน การดีสชาร์จไม่ควรจะเกิดขึ้นจนกว่าระยะช่องว่างจะน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้ได้ความละเอียดถูกต้องมากที่สุด
2. ไอออนไนเซชัน (Ionisation) สารไดอิเล็กตริกควรที่จะสร้างเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเกิดดีสชาร์จเร็วที่สุด และเมื่อสวิตช์ออฟ (Off) สารไดอิเล็กตริกจำเป็นต้องกำจัดไอออนในเส้นทางดีสชาร์จเพื่อให้เกิดการดีสชาร์จใหม่ในตำแหน่งอื่นต่อไป
3. การหล่อเย็น (Cooling) อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในช่องว่างประมาณ 10,000 องศาเซลเซียส ภายในเวลาเศษส่วนล้านของวินาที ความร้อนที่เกิดขึ้นต้องระบายออก ดังนั้นสารไดอิเล็กตริกจึงทำหน้าที่ระบายความร้อนจากชิ้นงานและอิเล็กโทรด ความร้อนที่สูงเกินไปจะทำให้อิเล็กโทรดสึกหรอมากในเวลาเดียวกันไอของโลหะก็จะกลั่นตัวในสารไดอิเล็กตริกด้วย
4. พัดพาอนุภาคโลหะอนุภาคโลหะ จากกระบวนการอีดีเอ็มในช่องว่างดีสชาร์จจะถูกสารไดอิเล็กตริกพัดพาออกมา จึงช่วยกระบวนการให้ดำเนินไปได้ตามปกติมีประสิทธิภาพ ถ้าการไหลพัดพาเอาอนุภาคโลหะไม่ดียิ่งจะทำให้เกิดการหยุดนิ่งของสารไดอิเล็กตริก ทำให้มีอนุภาคโลหะคั่งค้างในช่องว่างและอาจเกิดการลัดวงจรได้ เนื่องจากสารไดอิเล็กตริกที่ใช้งานแล้วต้องผ่านการทำความสะอาดโดยเครื่องกรอง กรองเอาอนุภาคโลหะออกจากสารไดอิเล็กตริกแล้วจึงนำกลับมาใช้งานใหม่ต่อไป

2.4.2 ประเภทของสารไดอิเล็กตริก สารไดอิเล็กตริกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.4.2.1 น้ำกำจัดไอออน

สารละลายน้ำหรือน้ำในสภาวะปกติจะมีไอออนผสมอยู่มาก จึงมีค่าความต้านทานต่ำ ดังนั้นเวลาที่จะแปรรูปโลหะจึงต้องผ่านกระบวนการทำให้มีความต้านทานสูงขึ้น เนื่องมาจากน้ำมีค่าความต้านทานต่ำกว่าน้ำมัน จึงทำให้กระแสไฟฟ้าโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ความเร็วในการกัดโลหะจึงสูงกว่าน้ำมันประมาณ 2-10 เท่า แต่คุณภาพผิวงานจะหยาบ ปกติแล้วน้ำจะใช้เป็นสารไดอิเล็กตริกในเครื่องอีดีเอ็มประเภทตัดด้วยเส้นลวด

2.4.2.2 ไฮโดรคาร์บอน ที่นิยมใช้กันมีหลายชนิดคือ

1. น้ำมัน (Oils) ที่ใช้กันมากได้แก่น้ำมันแร่ (Mineral) ซึ่งให้ผลลัพท์ดี น้ำมันแร่จะไม่มี Aromatics หรือสารเพิ่มเติมอื่นๆ ความหนืดของน้ำมันเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เช่น น้ำมันที่มีความหนืดสูงจะไม่เหมาะสมกับงานขั้นตอนการกัดผิวสำเร็จเนื่องจากขั้นตอนนี้ต้องดึงช่องว่างแคบลง จึงทำให้น้ำมันที่มีความหนืดสูงไหลเวียนได้ยากขึ้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน สำหรับขั้นตอนการกัดหยาบจะใช้น้ำมันเคาเป็นสาร ไลโอเล็กริก จุดวาบไฟของสาร ไลโอเล็กริกก็มีความสำคัญ เพราะถ้าจุดเดือดต่ำ แนวน้ำมันที่จะกลายเป็นไอจะเกิดขึ้นได้ง่าย ทำให้เกิดแก๊สปริมาณมาก จึงต้องลดความเร็วการแปรรูปลง
2. น้ำมันก๊าด (Kerosene) มีความหนืดต่ำ ทำให้เหมาะกับการขั้นตอนการกัดละเอียดและละเอียดมาก แนะนำให้ใช้กับการแปรรูปลอหะทั้งสะเดนคาร์ไบด์ เมื่อตั้งช่วงพัลส์และเมื่อต้องการกำจัดกลิ่นที่เกิดจากสารที่แตกตัว นอกจากนี้ น้ำมันก๊าดแล้วยังมีน้ำมันอื่นๆอีกเช่น น้ำมันจักร (Spindle Oil) น้ำมันเครื่องกล (Machine Oil)

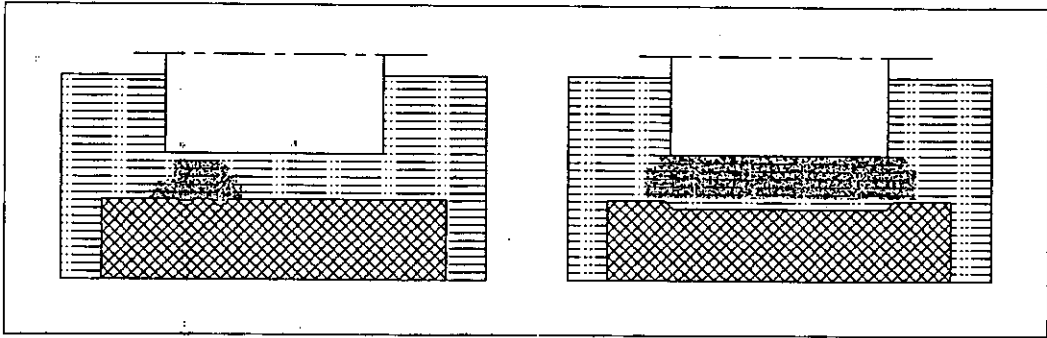
น้ำมันที่มีจุดวาบไฟสูงและจุดติดไฟสูงนิยมนำมาใช้งาน น้ำมันซิลิคอนจึงเป็นประโยชน์ในแง่คิดนี้ และการขนส่งก็ปลอดภัยด้วย สาร ไลโอเล็กริกต้องไม่เป็นอันตรายต่อผิวหนังและเสื้อผ้า แก๊สที่เกิดจากการแตกตัวของความร้อนต้องไม่เป็นอันตราย โดยทั่วไปแก๊สจะค่อยๆ ปรากฏขึ้นโดยคิซาร์จในของเหลวไฮโดรคาร์บอนด์ ส่วนใหญ่ได้แก่ อาเซทิลีน (C_2H_2) แอททิลีน (C_2H_4) มีเทน (CH_4) และ ไฮโดรเจน จึงต้องมีเครื่องมือตรวจแก๊สเพื่อความปลอดภัย

2.4.3 คุณสมบัติของสาร ไลโอเล็กริก

1. มีความหนืดต่ำ
2. มีจุดเดือดสูง และจุดวาบไฟสูง
3. มีคุณสมบัติความเป็นฉนวนสูง
4. ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายและผิวหนัง
5. ต้องไม่เกิดแก๊สที่เป็นอันตรายจากการแตกตัวหรือสลายตัวเนื่องจากความร้อน
6. ไม่กัดกร่อนชิ้นงาน
7. มีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดี
8. มีราคาถูกหรือประหยัด

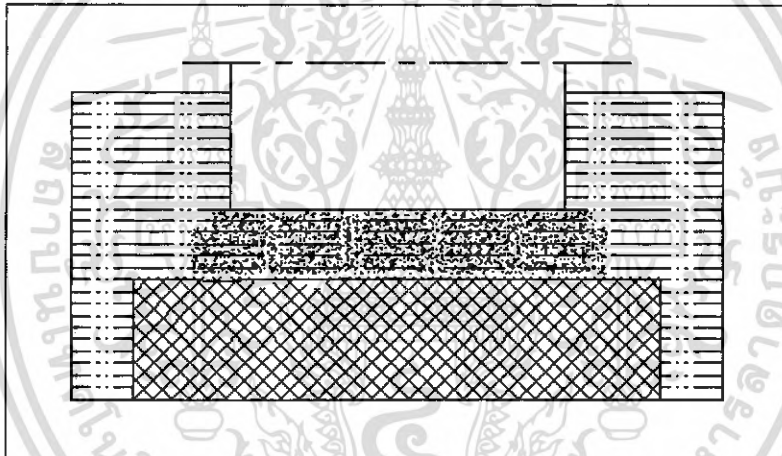
2.5 ระบบการไหลของ ไลโอเล็กริก (Flushing)

การไหลที่ถูกต้องของสาร ไลโอเล็กริกระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน จะทำให้การทำงานของระบบอีซีเอ็มมีประสิทธิภาพ ถ้าหากกรรมวิธีอีซีเอ็มไม่ใช้ระบบการไหลของสาร ไลโอเล็กริกจะมีผลกระทบดังนี้ ในตอนเริ่มต้นแรกสาร ไลโอเล็กริกยังสะอาดอยู่ ไม่มีอนุภาคโลหะและคาร์บอนที่เกิดจากการแตกตัวของ ไลโอเล็กริก ทำให้ความคงทนต่อการเป็นฉนวนสูงกว่า ไลโอเล็กริกที่มีอนุภาคโลหะ ทำให้มีการประวิงก่อนที่ความเป็นฉนวนจะสิ้นสุดลง และเริ่มเกิดคิซาร์จ อนุภาคโลหะที่เกิดจากคิซาร์จในตอนแรกจะให้ความคงทนต่อการเป็นฉนวนของ ไลโอเล็กริกครั้งต่อมาลดลง และสามารถทำให้เกิดคิซาร์จง่ายขึ้น



รูปที่ 2-7 การสะสมของอนุภาค โลหะในช่องว่างเมื่อไม่ใช้ระบบการไหลของไดอิเล็กตริก

ถ้าหากความหนาแน่นของอนุภาค โลหะในช่องว่างมีมากขึ้น ก็จะทำให้เกิดการสะสมของอนุภาค โลหะก่อรูปเป็นสะพานตัวนำไฟฟ้า ทำให้เกิดการลัดวงจรที่ผิดปกติไปหรือเกิดการอาร์คขึ้น ทำให้ผิวของขี้นงานและ อิเล็กโทรดถูกทำลาย ด้วยเหตุนี้เองจึงต้องขจัดอนุภาค โลหะออกไปจากช่องว่างโดยระบบการไหลของไดอิเล็กตริกเข้าไปในช่องว่าง



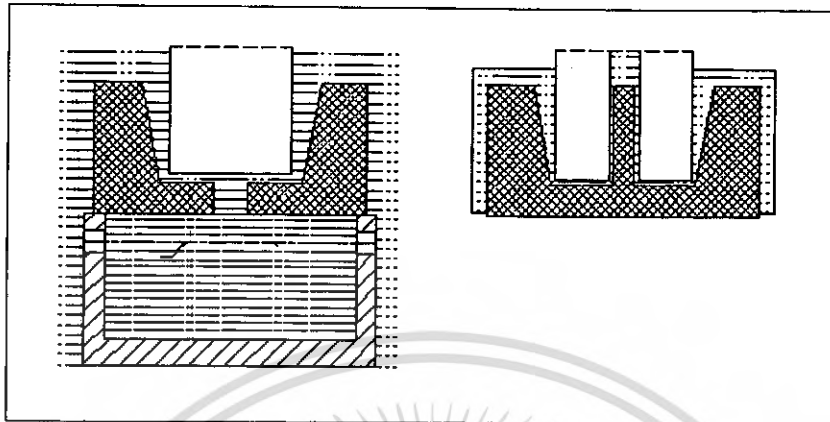
รูปที่ 2-8 อนุภาคโลหะก่อตัวเป็นสะพานตัวนำไฟฟ้า

2.5.1 ระบบการไหลของไดอิเล็กตริกในกรรมวิธีดีเอ็ม พิจารณาแบ่งออกได้ดังนี้

1. การไหลแบบฉีด (Injection Flushing)
2. การไหลแบบดูด (Suction Flushing)
3. การไหลด้านข้าง (Side Flushing)
4. การไหลที่ใช้การขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด (Flushing by Dielectric "Pumping")
5. การไหลแบบฉีดพร้อมกับการยกอิเล็กโทรดขึ้น

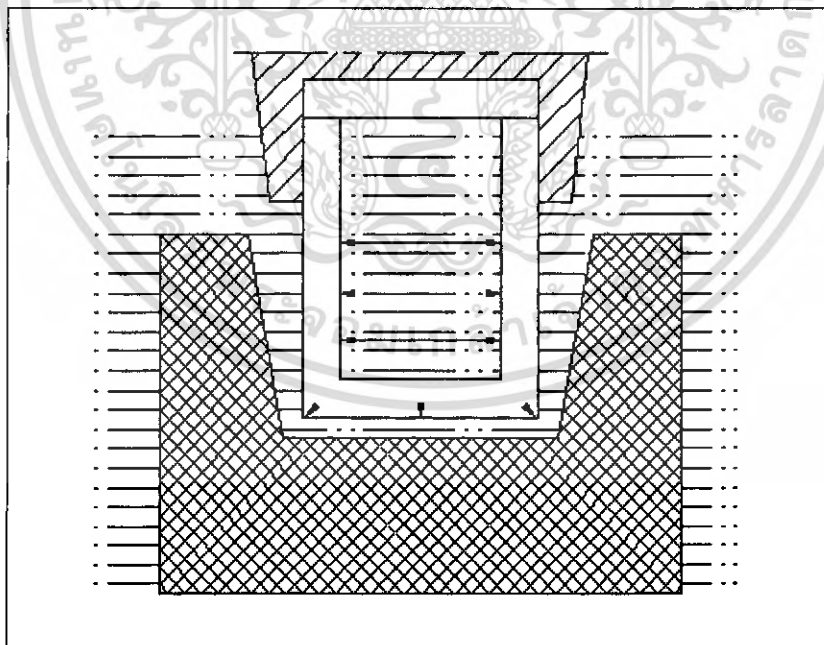
2.5.1.1 การไหลแบบฝืด

การไหลแบบนี้ ใค้เล็กคริกจะถูกฝืดเข้าไปในบริเวณช่องว่างของชั้นงานและอิเล็กโทรด



รูปที่ 2-9 การไหลของ ใค้เล็กคริกแบบฝืด

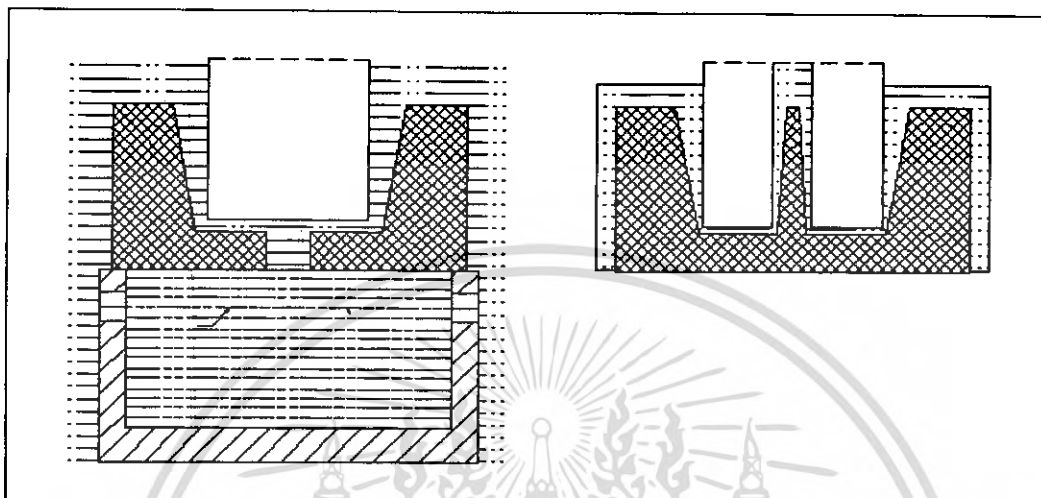
การไหลของ ใค้เล็กคริกแบบฝืด จะใช้กับชั้นงานที่มีลักษณะเป็นริ้วหรือใช้กับอิเล็กโทรดที่มีลักษณะแนวตั้งคองที่ สำหรับลักษณะของริ้วที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการคิสซาร์จทางด้านข้างของอิเล็กโทรด ระบบการไหลที่ดีจะทำให้สามารถเจาะรูลึกๆได้ โดยใช้อิเล็กโทรดครราไฟที่คั้งความคั้นของ ใค้เล็กคริกให้สูงขึ้นและไหลเข้าไปในอิเล็กโทรดครราไฟ รูพรุนของครราไฟจะทำให้ ใค้เล็กคริกไหลผ่านออกมาข้งบริเวณช่องว่างได้



รูปที่ 2-10 ใค้เล็กคริกไหลผ่านรูพรุนครราไฟออกมาที่บริเวณช่องว่าง

2.5.1.2 การไหลแบบคูด

การไหลแบบนี้ไดอิเล็กทริกจะถูกคูดออกผ่านรูของชิ้นงาน หรือรูของอิเล็กโทรด เมื่อเปรียบเทียบกับกรไหลแบบฉีดจะเห็นว่าแบบคูดหลีกเลี่ยงผลกระทบของรีเวจจากการเกิดคิสซาร์จทางด้านข้างของอิเล็กโทรด รูที่เจาะจึงเป็นทรงกระบอกกลม ความดันของการคูดสุญญากาศต้องไม่น้อยกว่า 0.8-0.9 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร



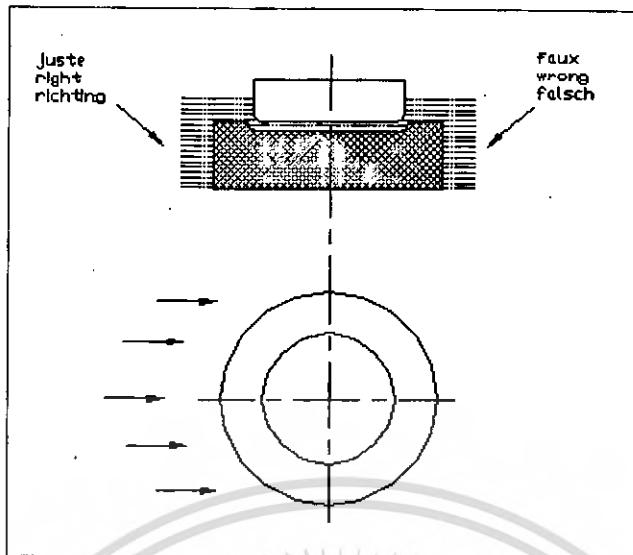
รูปที่ 2-11 การไหลของไดอิเล็กทริกแบบคูด

การใช้งานของการไหลแบบคูดจะสามารถใช้ลักษณะเดียวกับการไหลแบบฉีด แต่การไหลแบบคูดนิยมให้ไดอิเล็กทริกไหลผ่านอิเล็กโทรดมากกว่าที่จะผ่านชิ้นงาน

2.5.1.3 การไหลด้านข้าง

วิธีนี้จะใช้เมื่อไม่สามารถเจาะรูของอิเล็กโทรดหรือชิ้นงานได้ เช่นกรณีของแม่พิมพ์บีบเหรียญ ร่องลึกที่แคบของแบบหล่อพลาสติก จึงต้องให้การไหลของไดอิเล็กทริกกระทำทางด้านข้างโดยการใช่วัสดุ ซึ่งต้องระมัดระวังในการปรับให้พื้นผิวของการทำงานของอิเล็กโทรดมีการไหลที่เท่าๆกัน เทคนิคนี้จะใช้ร่วมกับการกระเพื่อมของอิเล็กโทรด เพื่อช่วยให้การไหลดีขึ้น เมื่อทำการแปรรูปพื้นผิวหน้าเรียบ ทิศทางการไหลของไดอิเล็กทริกจะต้องสอดคล้องกับมุมฉีดไดอิเล็กทริกเข้า สำหรับแม่พิมพ์บีบเหรียญเมื่อรูปแบบตามยาวไม่เรียบจะต้องใช้หัวฉีดแบบพิเศษมาใช้ และเมื่อทิศทางการไหลของไดอิเล็กทริกไม่ขนานกับด้านข้างของอิเล็กโทรดจะทำให้การไหลปั่นป่วนขึ้น ดังนั้นจะมีไดอิเล็กทริกจำนวนน้อยเข้าไปภายในช่องว่างเท่านั้นจึงทำให้ระบบการไหลไม่ดี แต่ถ้การไหลของไดอิเล็กทริกมีทิศทางการเข้าไปในช่องว่างโดยตรง จะทำให้ปริมาณของไดอิเล็กทริกเข้าไปจำนวนมาก ทำให้การไหลมีประสิทธิภาพดีขึ้น ระบบการไหลทางด้านข้างจะไม่ใช้พร้อมกันทั้งสองด้านของอิเล็กโทรด เพราะจะทำให้อนุภาคโลหะที่บริเวณส่วนล่างของชิ้นงานไม่สามารถจะถูกขับออกมาจากช่องว่างได้

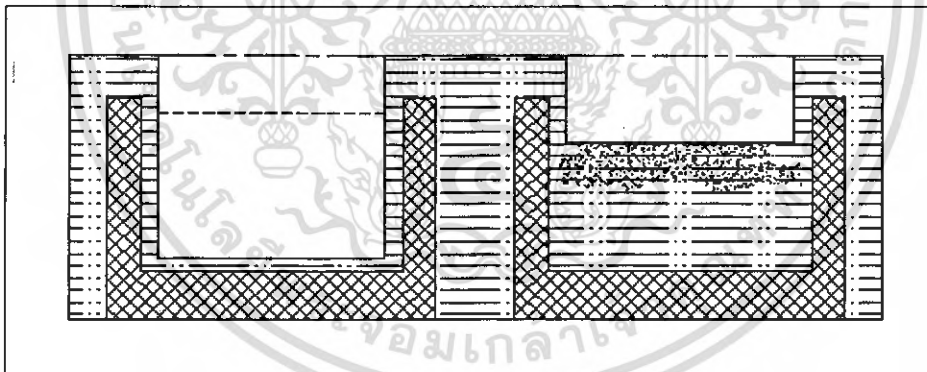
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2-12 การ ไหลของไดอิเล็กตริกทางด้านข้าง

2.5.1.4 การไหลที่ใช้การขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด

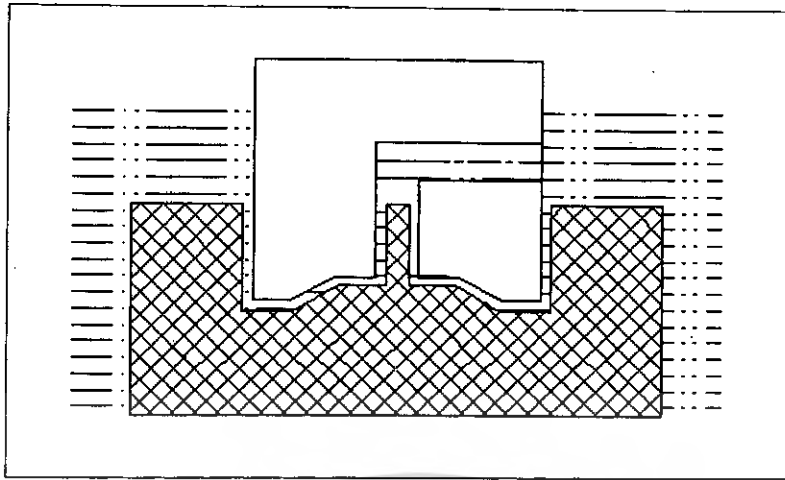
การไหลของไดอิเล็กตริกแบบนี้จะอาศัยการยกขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด เมื่ออิเล็กโทรดถูกยกขึ้นจะทำให้ช่องว่างกว้างขึ้น ไดอิเล็กตริกที่สะสมจะถูกดูดเข้าไปผสมกับอนุภาคโลหะ และเมื่ออิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลง อนุภาคโลหะก็จะถูกขับออกไป วิธีการนี้จะใช้กับชิ้นงานที่มีความลึก และในระบบการไหลต้องไม่มีความดัน



รูปที่ 2-13 การไหลของไดอิเล็กตริกโดยอาศัยการขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด

2.5.1.5 การไหลแบบฉีดพร้อมกับการยกอิเล็กโทรดขึ้น

เมื่อทำการแปรรูปโลหะโดยใช้อิเล็กโทรดชนิดโลหะจะเห็นความผิดปกติของอิเล็กโทรดที่ใช้ในระบบการไหลแบบฉีด มีการสึกหรอมาก และเพิ่มขึ้นคามความดันในบริเวณที่ฉีด

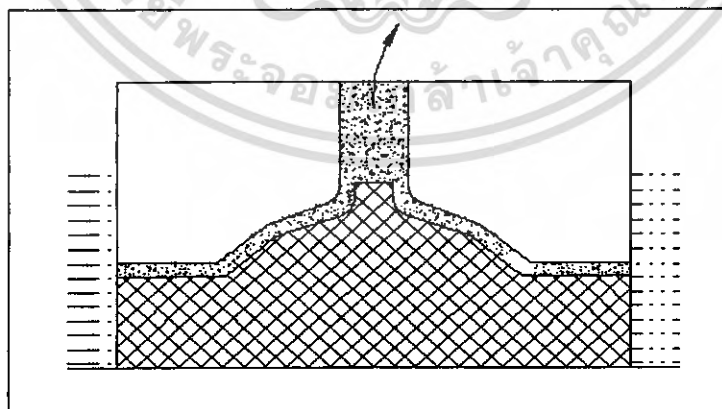


รูปที่ 2-14 การไหลแบบฉีดพร้อมกับเดือนอิเล็กทรอนิกส์

การที่จะป้องกันการสึกหรอที่เกิดจากความดันจะใช้วิธีการฉีดไดอิเล็กทริกเข้าไปในช่องว่าง ในขณะเดียวกันอิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ขึ้นด้วย

2.5.2 ปัญหาแก๊ส (Gas Problem)

ในระบบการไหลแบบฉีดระหว่างการแปรรูปจะมีการสะสมของแก๊ส ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการระเบิดและจะทำให้ชิ้นงานเคลื่อนได้ จึงต้องระมัดระวังไม่ให้เกิดขึ้น ที่สำคัญคือต้องหลีกเลี่ยงแนวโน้มที่จะเป็นสาเหตุของการระเบิด เช่น แก๊ส อากาศ ดังนั้นก่อนจะเริ่มทำการแปรรูป ต้องมั่นใจว่าภายในอุปกรณ์ฉีดมีไดอิเล็กทริกเต็ม และภายในถังบรรจุมีไดอิเล็กทริกตามที่กำหนด เพื่อป้องกันปั๊มไม่ให้ดูดเอาอากาศเข้าไป เพื่อที่จะลดปริมาณการสะสมของแก๊สในอุปกรณ์ ต้องพยายามให้ทางลัดของอุปกรณ์อยู่ในจุดที่สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เมื่อทำการแปรรูปด้วยอิเล็กทรอนิกส์แบบเว้าเข้า จะทำให้มีการสะสมของแก๊สภายในส่วนที่เว้านั้น จึงต้องทำการเจาะรูอิเล็กทรอนิกส์เพื่อระบายแก๊สออกไป



รูปที่ 2-15 การเจาะรูอิเล็กทรอนิกส์เพื่อระบายแก๊สที่เกิดขึ้น

2.6 ระบบเซอร์โว (Servo System)

ระบบเซอร์โวคือระบบควบคุมบังคับกลไกการป้อนอิเล็กทรอนิกส์ โดยอาศัยสัญญาณความแตกต่างของโวลต์เทจจากช่องว่างคิซาร์ชกับโวลต์เทจอ้างอิงเป็นตัวแทนเปรียบเทียบ เพื่อทำการควบคุมกลไกการป้อนอิเล็กทรอนิกส์ให้เหมาะสมกับอัตราการกัดเนื้อโลหะงาน

เนื่องจากช่องว่างจะมีเศษอนุภาคโลหะจากการคิซาร์ช แก๊สและทาร์ที่เกิดจากการแตกตัวของไดอิเล็กทริกเนื่องจากความร้อน จะทำให้การเกิดคิซาร์ชจรั้งค่อไปขาดเสถียรภาพและอาจทำให้เกิดลัดวงจร การสัมผัสโดยตรงระหว่างอิเล็กทรอนิกส์กับชิ้นงานจะทำให้เกิดการลัดวงจรด้วย ทำให้การคิซาร์ชจขาดหายไป ประสิทธิภาพการกัดจะจึงลดลง เมื่อช่องว่างมีความห่างพอเหมาะ ปริมาณการกัดเนื้อโลหะจะคงที่ แต่เมื่อช่องว่างแคบลงพลังงานคิซาร์ชที่ช่องว่างก็จะลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการกัดเนื้อโลหะต่ำลง

เพื่อที่จะรักษาการกัดเนื้อโลหะให้เหมาะสม จะต้องทำการควบคุมกลไกการป้อนอิเล็กทรอนิกส์ให้มีระยะช่องว่างคงที่ ในขณะที่เดียวกันก็ป้องกันการสัมผัสระหว่างอิเล็กทรอนิกส์กับชิ้นงาน ขณะที่อิเล็กทรอนิกส์และชิ้นงานจะสึกไปด้วย เนื่องจากช่องว่างนี้จะแคบมากจึงไม่สามารถรักษาให้คงที่ได้ตามสัดส่วนของการสึก ดังนั้นการป้อนอิเล็กทรอนิกส์จะใช้ระบบควบคุมแบบ Adaptive Control

2.6.1 ระบบควบคุมการป้อนอิเล็กทรอนิกส์ในกรรมวิธีอีเอ็ม แ่งออกเป็น

1. ควบคุมการป้อนอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้โซลินอยด์
2. ควบคุมการป้อนอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้เซอร์โวไฟฟ้า
3. ควบคุมการป้อนอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้เซอร์โวไฮดรอลิก

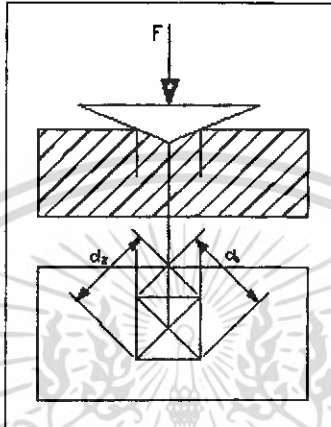
2.7 Vickers Micro Hardness Test

เป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา (เป็นมุมที่มีองศาใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด) เป็นเวลา 10-15 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวเช่นเดียวกับการทดสอบแบบบริเนลล์แต่วิธีนี้หัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมาก ๆ ดังนั้นในการใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมาก (HV ประมาณ 5) จนถึงโลหะที่แข็งมาก ๆ (VHN ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ ซึ่งทำให้วิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่าบริเนลล์ คือ ไม่ต้องคำนึงถึงอัตราส่วน P/D^2 และข้อจำกัดในด้านความหนาของชิ้นงานทดสอบเนื่องจากหัวกดเพชรมีขนาดเล็กมาก Vickers Micro Hardness เป็นการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์โดยใช้แรงกดขนาดน้อยๆ ตั้งแต่ 50-1000 กรัมแรง (gf) หรือ 0.4903-9.807 นิวตัน โดยสามารถหาค่าความแข็งได้จากสูตรความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงกดที่ใช้ในการกดหัวกดเพชรรูปพีระมิด มุมระหว่างด้านประกอบมุมยอดที่อยู่ตรงข้ามเท่ากับ 136 องศา กับพื้นที่ของรอยกดที่เกิดบนผิวชิ้นทดสอบ คือ

$$HV = F/S = (2F \sin 136^\circ/2)/D^2 = 1.8544(F/D^2) \quad (2.1)$$

โดยที่

- HV = ค่าความแข็งวิกเกอร์
 F = แรงกด (กรัมแรง)
 S = พื้นที่ของรอยกด (ตารางมิลลิเมตร)
 D = ค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นทแยงมุม (มิลลิเมตร)



รูปที่ 2-16 ลักษณะรอยกดจากหัวเพชรของ Vickers Micro Hardness Test

ข้อควรระวังสำหรับการวัดความแข็งด้วยวิธีนี้ ได้แก่

1. การเลือกใช้น้ำหนักกดมีผลต่อความแข็งด้วย คือ ถ้าเลือกน้ำหนักน้อยเกินไป จะได้ค่าความแข็งที่ผิด แต่ถ้าขึ้นงานหนักและใช้น้ำหนักกดมากเกินไป อาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับหัวกดเพชรตอนคล้ายหัวกดได้
2. ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องไม่มี Oxide Scale หรือสิ่งแปลกปลอม การเตรียมผิวของชิ้นทดสอบต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก และหลีกเลี่ยงกรรมวิธีร้อน (Heating) หรือกรรมวิธีเย็น (Cold Working)
3. ไม่ควรวัดความแข็งในบริเวณที่ใกล้กับตำแหน่งเดิม โดยควรเว้นระยะห่างไว้ไม่น้อยกว่า 2.5 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด ทั้งตามแนวแกน x และ y
4. ความหนาของชิ้นงานทดสอบควรมากกว่าอย่างน้อย 1.5 เท่าของเส้นทแยงมุมของรอยกด และหลังจากการทดสอบวัดความแข็ง ไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ให้เห็นทางด้านหลัง (อีกด้านหนึ่ง) ของชิ้นงานทดสอบ
5. การอ่านค่าความยาวเส้นทแยงมุม จะขึ้นกับสายตาของแต่ละคน ดังนั้นควรให้คนใดคนหนึ่งเป็นผู้อ่านค่า วิธีทดสอบนี้ไม่เป็นที่นิยมในการใช้งานสำหรับภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากข้อจำกัดที่ทดสอบได้ช้า ต้องมีเตรียมผิวที่ดี เพื่อให้ได้ค่าเส้นทแยงมุมของรอยกดที่แน่นอน และมีโอกาสผิดพลาดในการวัดระยะเส้นผ่านศูนย์กลางได้

2.8 การวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดลองโดยใช้หลักการทางสถิติ

หลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูลอาจใช้ซอฟต์แวร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ด้วย ซึ่งปัจจุบันมีซอฟต์แวร์อยู่หลายประเภทที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้วิธีการถูกนำมาใช้อย่างได้ผลคือกราฟอย่างง่ายคือช่วยในการวิเคราะห์และตีความข้อมูลจากการทดลอง การตรวจสอบความเพียงพอของโมเดล (Model Adequacy Checking) เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เพื่อความเชื่อมั่นของข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากการทดลอง จึงจำไว้ว่าวิธีทางสถิติไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าปัจจัยมีอิทธิพล ได้อย่างแน่นอนเพียงแต่เป็นเครื่องมือที่ช่วยให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ความเชื่อมั่น โดยระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ในการสรุปผลการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามการใช้หลักการทางสถิติช่วยให้การตัดสินใจเป็นนามธรรมมากยิ่งขึ้น

2.8.1 การใช้หลักทางสถิติในการทดลอง

การใช้หลักทางสถิติในการทดลองนั้นผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจในประเด็นต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ผู้ทำการทดลอง ต้องมีความรู้เกี่ยวกับงานในสาขาที่จะทำการทดลอง โดยใช้ความรู้ที่ไม่ใช่วิธีการทางสถิติในการพิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้น
2. ผู้ทำการทดลอง ควรเลือกการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ที่ง่ายและไม่ซับซ้อน
3. ผู้ทำการทดลองควรเข้าใจความแตกต่างระหว่างนัยสำคัญในทางปฏิบัติและนัยสำคัญทางสถิติ เพราะว่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในการทดลองซึ่งเรียกว่าความแตกต่างทางค่านสถิติ นั้นไม่สามารถประกันได้ว่า จะมีความแตกต่างมากเพียงพอที่จะใช้ในทางปฏิบัติ และจะต้องคำนึงถึงต้นทุนว่าคุ้มค่าในการลงทุนหรือไม่
4. ทำการทดลอง ควรทำการทดลองซ้ำๆ หลายๆ ครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าผลที่ได้ถูกต้อง

2.8.2 การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบ

2.8.2.1 ความหมายของสมมติฐานทางสถิติ

สมมติฐาน คือ ความเชื่อมั่นของบุคคลใดบุคคลหนึ่งหรือของกลุ่มของบุคคลใดๆ หรืออาจกล่าวได้ว่าสมมติฐานเป็นสิ่งที่บุคคลหรือองค์กรคาดว่าจะเกิดขึ้น ความเชื่อมั่นหรือสิ่งที่คาดนั้นอาจเป็นจริงหรือไม่ก็ได้

2.8.2.2 ชนิดของสมมติฐาน

สมมติฐานแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ดังต่อไปนี้

1. สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) หรือใช้สัญลักษณ์ H_0
2. สมมติฐานอื่นๆ (Alternative Hypothesis) ใช้สัญลักษณ์ H_1

สมมติฐานหลักที่ตั้งขึ้น เพื่อทดสอบว่าจะยอมรับหรือไม่ว่าเป็นจริง การปฏิเสธไม่ยอมรับสมมติฐานหลักก็คือการยอมรับสมมติฐานอื่นๆ ว่าเป็นจริง

ประเภทของสมมติฐาน สมมติฐานแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้

1. สมมติฐานเดี่ยว (Simple Hypothesis) คือ สมมติฐานที่กำหนดค่าเฉพาะของค่าพารามิเตอร์เจาะจงลงไปว่าค่าเท่ากับเท่าใด
2. สมมติฐานรวม (Composite Hypothesis) คือ สมมติฐานประเภทที่มีค่าพารามิเตอร์หลายค่า

2.8.2.3 ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน

ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

1. ความผิดพลาดประเภทที่ 1 (Type I Error) หรือเรียกโดยทั่วไปว่าระดับนัยสำคัญ (Level of Significance) ใช้สัญลักษณ์ α เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานอื่น ๆ โดยที่สมมติฐานหลักเป็นจริง
2. ความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type II Error) ใช้สัญลักษณ์ β เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการยอมรับสมมติฐานอื่น ๆ โดยที่สมมติฐานอื่น ๆ เป็นจริง

ในการทดสอบแต่ละครั้ง ผู้ทดสอบย่อมต้องการให้มีความผิดพลาดทั้งสองประเภท (α และ β) น้อยที่สุดแต่เมื่อค่าของ α ลดลง ค่าของ β จะเพิ่มขึ้นในทำนองเดียวกัน เมื่อค่าของ α เพิ่มขึ้น ค่าของ β จะลดลง ดังนั้นเมื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดทั้งสองประเภทให้ลดลงได้พร้อม ๆ กันทำได้ด้วยการเพิ่มจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้มากขึ้น

2.8.2.4 การตั้งสมมติฐานในการทดลอง

การตั้งสมมติฐานในการทดลอง สามารถแบ่งเป็น 3 กรณี ดังต่อไปนี้

1. การทดลองแบบผลกระทบบคงที่ (Fixed Effect Model) จะทำการตรวจสอบว่าปัจจัยต่าง ๆ มีผลกระทบต่อกระบวนการหรือไม่ สามารถตั้งสมมติฐานได้ดังต่อไปนี้

$$H_0: \text{ปัจจัยไม่มีผลต่อกระบวนการ}$$

$$H_1: \text{ปัจจัยมีผลต่อกระบวนการ}$$

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปสัญลักษณ์ μ เมื่อ μ ค่าเฉลี่ยของปัจจัย

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_o = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0; \text{อย่างน้อยที่สุดครั้งหนึ่ง}$$

2. การทดลองแบบผลกระทบแบบสุ่ม (Random Effects Model) จะทำการตรวจสอบว่า ความแปรปรวน (σ^2_r) จะมีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่ เพราะไม่สามารถหาค่าของอิทธิพล (Effect) ของระดับของปัจจัยที่เกิดขึ้นมาแน่นอน สมารถตั้งสมมติฐานดังต่อไปนี้

$$H_0: \sigma^2_r = 0$$

$$H_1: \sigma^2_r > 0$$

1. การทดลองแบบผสม (Mixed Effect Model) เมื่อปัจจัยในการทดลองเป็นแบบผลกระทบบคงที่ (Fixed Level) และแบบสุ่ม (Random Level) รวมกันจะต้องใช้การตั้งสมมติฐานของ 2 กรณีที่กล่าวข้างต้นโดยแยกคามลักษณะรูปแบบของปัจจัยนั้น ๆ

2.8.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) คือ เทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรความแปรปรวนหรือความผันแปรที่เกิดขึ้นในข้อมูลออกเป็นส่วนย่อยๆ ตามแหล่งที่คาดว่าทำให้เกิดความผันแปร ความผันแปรที่เกิดในข้อมูลเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ความผันแปรทั้งหมด} = \text{ความผันแปรเนื่องจากปัจจัย} + \text{ความผันแปรโดยธรรมชาติของข้อมูล} \quad (2.2)$$

สมการ 2.2 ได้จากข้อคิดที่ว่า ความแตกต่างกันของข้อมูลไม่น่าจะมาจากสาเหตุของความผันแปรโดยธรรมชาติ หรือที่เรียกกันว่าความผิดพลาดแบบสุ่มของข้อมูลแต่เพียงอย่างเดียวแต่น่าจะมาจากปัจจัยหนึ่งปัจจัยใดหรือ หลายๆ ปัจจัยที่ทำให้เกิดความผันแปร ดังนั้นความผันแปรทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับข้อมูลจึงเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยของธรรมชาติของข้อมูล

ปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อความผันแปรของข้อมูลถือได้ว่าเป็นตัวแปรอิสระซึ่งมีผลต่อตัวแปรตาม โดยเป็นข้อมูลที่วัดผลหรือเก็บรวบรวมมา ตัวแปรอิสระดังกล่าวมักจะไม่ได้มีเพียงค่าเดียวแต่จะมีหลายค่าซึ่งเรียกว่าระดับของปัจจัย ถ้าปัจจัยนั้นมีผลต่อตัวแปรตามจริงๆ แต่ละระดับก็จะมีผลต่อตัวแปรตามไม่เหมือนกัน การวิเคราะห์จึงทำโดยการทดลองกำหนดค่าตัวแปรอิสระที่ระดับต่างๆ เพื่อหาตัวแปรตามที่เกิดขึ้นจากการทดลองนั้นๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ดูว่าความผันแปรที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการทดลองนั้นมีนัยสำคัญหรือไม่เมื่อเทียบกับความผันแปรโดยธรรมชาติของตัวแปรตาม และเพื่อที่จะช่วยให้ผู้วิเคราะห์มีความเชื่อมั่นในผลของการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองมักจะต้องทำการทวนซ้ำให้ได้จำนวนข้อมูลที่แต่ละการทดลองมากพอ การเลือกระดับของปัจจัยถ้าเป็นการเจาะจงรูปแบบของการทดลองจะถูกเรียกว่าแบบผลกระทบบคงที่ (Fixed Effect Model) ผลที่ได้จากการทดลองจะสรุปเฉพาะอิทธิพลของปัจจัยที่ระดับที่นำมาทดลอง แต่ถ้าเลือกระดับของปัจจัยเป็นการเลือกสุ่ม รูปแบบของการทดลองจะเป็นแบบสุ่ม (Random Effect Model) ผลที่ได้จากการทดลองจะสรุปอิทธิพลโดยรวมของปัจจัย

จาก ความผันแปรทั้งหมด = ความผันแปรเนื่องจากปัจจัย + ความผันแปรโดยธรรมชาติของข้อมูล หรือเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$SS_r = SS_{Tr} + SS_E \quad (2.3)$$

โดยที่ SS_r คือ ผลบวกกำลังสองทั้งหมด
 SS_{Tr} คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากอิทธิพลของปัจจัย
 SS_E คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากความผิดพลาดแบบสุ่ม

การวัดความผันแปรของข้อมูลในการทดลองนั้นจะใช้ตัวประมาณค่าของความแปรปรวน (Variance) ที่ดีที่สุดคือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (Mean Square : MS) โดยที่ค่า MS สามารถคำนวณได้จาก

$$MS = \frac{SS}{DF} \quad (2.4)$$

เมื่อ

SS คือ ผลบวกกำลังสอง (Sum of Square)

DF คือ ชั้นของความอิสระ

สถิติทดสอบ (Test Statistic) ที่นำมาเปรียบเทียบกับค่าความผันแปรคือ

$$F = \frac{MS_{\tau}}{ME_E} \quad (2.5)$$

เมื่อ

MS_{τ} คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของปัจจัย

ME_E คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม

เปรียบเทียบกับค่าสถิติสำหรับทดสอบ F กับค่า F_{α, v_1, v_2}

ถ้า $F \geq F_{\alpha, v_1, v_2}$ ปฏิเสธ H_0

ถ้า $F < F_{\alpha, v_1, v_2}$ ยอมรับ H_0

เมื่อ

α คือ ระดับนัยสำคัญ (Level of Significance)

V_1 คือ ชั้นของความอิสระปัจจัย

V_2 คือ ชั้นของความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม

2.8.3.1 รูปแบบเชิงเส้นทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้นจำเป็นต้องสร้างรูปแบบเชิงเส้นทางสถิติ (Linear Statistical Model) ขึ้นด้วย ซึ่งรูปแบบเชิงเส้นทางสถิติจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของแผนการออกแบบการทดลอง จะแสดงดังตัวอย่างต่อไปนี้ การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีที่มี 3 ปัจจัย รูปแบบเชิงเส้นคือ

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijk} \quad (2.6)$$

โดยที่

$i = 1, 2, 3, \dots, a$ (ระดับของปัจจัย A)

$j = 1, 2, 3, \dots, b$ (ระดับของปัจจัย B)

$k = 1, 2, 3, \dots, c$ (ระดับของปัจจัย C)

$l = 1, 2, 3, \dots, n$ (จำนวนซ้ำ)

และ

y_{ijk} คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม

μ คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่

τ_i คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย A

β_j คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย B

γ_k คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย C

- $(\tau\beta)_{ij}$ คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย A และ B
- $(\tau\gamma)_{ik}$ คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย A และ C
- $(\beta\gamma)_{jk}$ คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย B และ C
- $(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย A, B และ C
- ϵ_{ijm} คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม

โดยข้อมูลจะถูกนำมาคำนวณแล้วใส่ไว้ในตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2-1 แสดงการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F ₀
A	SS _A	a-1	SS _A / DF	MS _A / MS _E
B	SS _B	b-1	SS _B / DF	MS _B / MS _E
C	SS _C	c-1	SS _C / DF	MS _C / MS _E
AB	SS _{AB}	(a-1)(b-1)	SS _{AB} / DF	MS _{AB} / MS _E
AC	SS _{AC}	(a-1)(c-1)	SS _{AC} / DF	MS _{AC} / MS _E
BC	SS _{BC}	(b-1)(c-1)	SS _{BC} / DF	MS _{BC} / MS _E
ABC	SS _{ABC}	(a-1)(b-1)(c-1)	SS _{ABC} / DF	MS _{ABC} / MS _E
Error	SS _E	Abc(n-1)	SS _E / DF	
Total	SS _T	Abcn-1		

$$SS_r = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^m y_{ijkl}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn}$$

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y_{i\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn}$$

$$SS_B = \frac{1}{bcn} \sum_{j=1}^b y_{j\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn}$$

$$SS_C = \frac{1}{bcn} \sum_{k=1}^c y_{k\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn}$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_B$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y_{ik\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_C$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^h \sum_{k=1}^c y_{ik...}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn}$$

$$SS_{ABC} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^h \sum_{k=1}^c y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC}$$

$$SS_E = SS_T - SS_{ABC}$$

การทดสอบสมมติฐานของการทดลอง จะใช้ค่าสถิติทดสอบที่มีการกระจายแบบเอฟ (F-Distribution) โดยกำหนดค่า α ก่อน หากค่า $F < F_{\alpha, v_1, v_2}$ ยอมรับ H_0 นั่นคือปัจจัยไม่มีผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น $(1 - \alpha)\%$ แต่ถ้าหาก $F \geq F_{\alpha, v_1, v_2}$ ปฏิเสธ H_0 นั่นคือปัจจัยนั้นมีผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น

2.8.3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่ามีผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักการสถิติหรือไม่ โดยอาศัยข้อสมมติฐานที่สำคัญซึ่งอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองดังต่อไปนี้

$$y_{ij} = \mu + \tau_j + \varepsilon_{ij} \quad (2.7)$$

โดยที่

- y_{ij} คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม
- μ คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่
- τ_j คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย
- ε_{ij} คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม

โดยความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) จะต้องมีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระต่อกัน ด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และ σ^2 มีค่าคงตัวแต่ไม่ทราบค่าซึ่งเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้ $\varepsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ถ้าสมมติฐานเหล่านี้เป็นจริงกระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ก็จะเป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการไม่มีความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของระดับที่ถูกต้อง

ในทางปฏิบัติสมมติฐานมักจะไม่เป็นเช่นนี้ ซึ่งจะเชื่อถือผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ก็ต่อเมื่อสามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานว่าเป็นจริงเสียก่อน โดยสามารถตรวจสอบสมมติฐานขั้นต้นและความถูกต้องของแบบจำลองได้โดยการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) สำหรับค่าสังเกต j ของระดับที่ i ส่วนตกค้างจะมีค่าเป็น

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \quad (2.8)$$

โดยที่ \hat{y}_{ij} คือค่าประมาณของค่าสังเกต y_{ij} ซึ่งหาได้จาก

$$\begin{aligned} y_{ij} &= \mu + \tau \\ &= \hat{y} + (\hat{y}_i + \hat{y}_j) \\ &= \hat{y}_i \end{aligned} \quad (2.9)$$

จากสมการค่าประมาณของค่าสังเกตใด ๆ ในระดับที่ i ก็คือค่าเฉลี่ยของระดับนั้น ๆ ดังนั้นการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบมีอยู่ 3 ประเภท คือ

1. การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการกระจายแบบปกติหรือไม่ โดยนำส่วนตกค้าง (Residual) ไปทดสอบโดยใช้วิธีดังต่อไปนี้
 - การทดสอบแบบไคร้สแควร์ (χ^2 - Goodness of Fit Test)
 - การทดสอบแบบโคลโกโมรอฟ - สเมอรันอฟ (Kolgomorov - Smimov Test)
 - การทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (NOPP)
2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันและกันหรือไม่ทดสอบโดยใช้แผนภูมิกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลแล้วดูลักษณะของข้อมูลว่ามีการกระจายตัวเป็นอิสระหรือมีลักษณะเป็นรูปแบบใด ๆ
3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูลทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะกระจายอยู่ทั่วไป ไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด และทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัย ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก แต่ถ้ารูปที่พล็อตขึ้นมาเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นลำดับแสดงว่าข้อมูลนั้น ไม่มีความเสถียรของความแปรปรวนหรือไม่มีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล

2.8.4 การทดสอบสมมติฐานผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของสองประชากร (μ_d) เมื่อสุ่มตัวอย่างไม่เป็นอิสระต่อกัน

เป็นการทดสอบสมมติฐานผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของสองประชากร โดยสุ่มตัวอย่างจากประชากรสองประชากร อย่างไม่เป็นอิสระกันหรือมีความสัมพันธ์กันหรือ โดยวิธีจับคู่ (Matched Pair)

การทดสอบสมมติฐานแบบจับคู่ในกรณีที่เป็นหน่วยตัวอย่างคนละหน่วยกัน ให้แบ่งหน่วยตัวอย่างออกเป็นสองกลุ่มเท่าๆกัน โดยให้หน่วยตัวอย่างของแต่ละกลุ่มที่มาจับคู่กันจะต้องมีลักษณะต่างๆคล้ายคลึงกันหรือเหมือนกันมากที่สุด ส่วนหน่วยตัวอย่างค่างคู่กันจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันหรือแตกต่างกันก็ได้ แล้วสุ่มสิ่งที่ต้องการ

ทดสอบในแต่ละกลุ่ม การเลือกหน่วยตัวอย่างโดยให้หน่วยตัวอย่างแต่ละคู่มีลักษณะอื่นๆที่ไม่ต้องการทดสอบคล้ายคลึงกัน เรียกว่า การเลือกหน่วยตัวอย่างที่ไม่เป็นอิสระกัน (Dependent Sample)

ส่วนการทดสอบสมมติฐานแบบจับคู่ในกรณีที่เป็นหน่วยตัวอย่างเดียวกัน แต่วัดผลสองครั้ง มักจะใช้กับการทดสอบผลต่างของผลของการไม่ใช้สิ่งที่ต้องการทดสอบกับผลของการใช้สิ่งที่ต้องการทดสอบ เช่น การเปรียบเทียบจำนวนอุบัติเหตุในโรงงานทั้งก่อนและหลังได้รับโปรแกรมป้องกันภัยจากอุบัติเหตุ หรือการเปรียบเทียบผลผลิตของโรงงานในโรงงานก่อนและหลังได้รับการฝึกอบรม เป็นต้น

ถ้าให้ X_{1i} และ X_{2i} เป็นค่าของข้อมูลคู่ที่ i จากประชากรที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$$d_i = X_{1i} - X_{2i} \quad ; \quad i = 1, \dots, n$$

$$\begin{aligned} \bar{d} &= \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \\ S_d^2 &= \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2 - n\bar{d}^2}{n-1} \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n d_i\right)^2}{n}}{n-1} = \frac{n\sum_{i=1}^n d_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n d_i\right)^2}{n(n-1)} \\ \text{และ} \quad S \frac{2}{d} &= \frac{S_d^2}{n} \end{aligned} \quad (2.11)$$

ถ้าเลือกหน่วยตัวอย่างโดยให้หน่วยตัวอย่างแต่ละคู่มีลักษณะอื่นๆที่ไม่ต้องการทดสอบคล้ายคลึงกันมากที่สุด ซึ่งมักจะกระทำได้ยากทางปฏิบัติ ขนาดตัวอย่างจึงต้องมีขนาดเล็ก ดังนั้นถ้าประชากรที่มีการแจกแจงแบบปกติ ไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากร และตัวอย่างมีขนาดเล็ก จะได้ว่า

$$t = \frac{\bar{d} - (\mu_1 - \mu_2)}{S_d / \sqrt{n}} \sim t_{(n-1)} \quad (2.12)$$

ภายใต้สมมติฐาน $H_0: \mu_1 - \mu_2 = d_0$ ดังนั้นตัวสถิติทดสอบคือ

$$t = \frac{\bar{d} - d_0}{s_d / \sqrt{n}} \quad (2.13)$$

โดยที่ d_0 เป็นค่าคงที่ที่ได้จากสมมติฐาน $H_0: \mu_1 - \mu_2 = d_0$ และให้ $\mu_1 - \mu_2 = \mu_d$ ดังนั้นสมมติฐานจะกลายเป็น $H_0: \mu_d = d_0$

2.8.4.1 การทดสอบแบบข้างเดียวด้านขวา

สมมติฐาน $H_0: \mu_d = d_0$ VS $H_1: \mu_d > d_0$

ถ้า $d_0 = 0$ สมมติฐานจะกลายเป็น

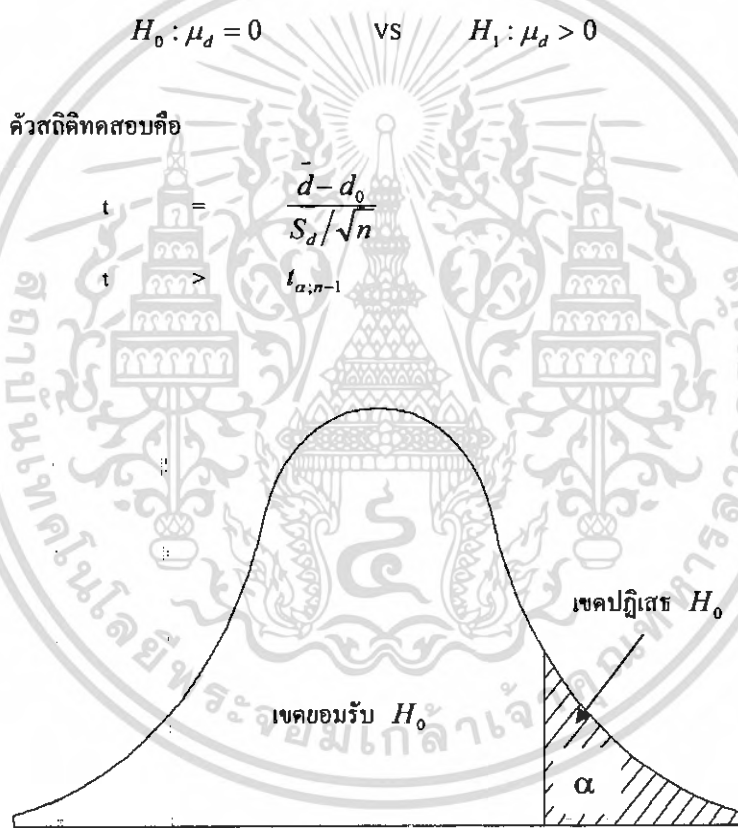
$H_0: \mu_d = 0$ VS $H_1: \mu_d > 0$

ตัวสถิติทดสอบคือ

$$t = \frac{\bar{d} - d_0}{s_d / \sqrt{n}}$$

เขตปฏิเสธ H_0

$t > t_{\alpha; n-1}$



รูปที่ 2-17 กราฟการแจกแจงแบบปกติแสดงเขตยอมรับ H_0 และเขตปฏิเสธ H_0 แบบข้างเดียวด้านขวา

2.8.4.2 การทดสอบแบบข้างเดียวด้านซ้าย

สมมติฐาน $H_0 : \mu_d = d_0$ vs $H_1 : \mu_d < d_0$

ถ้า $d_0 = 0$ สมมติฐานจะกลายเป็น

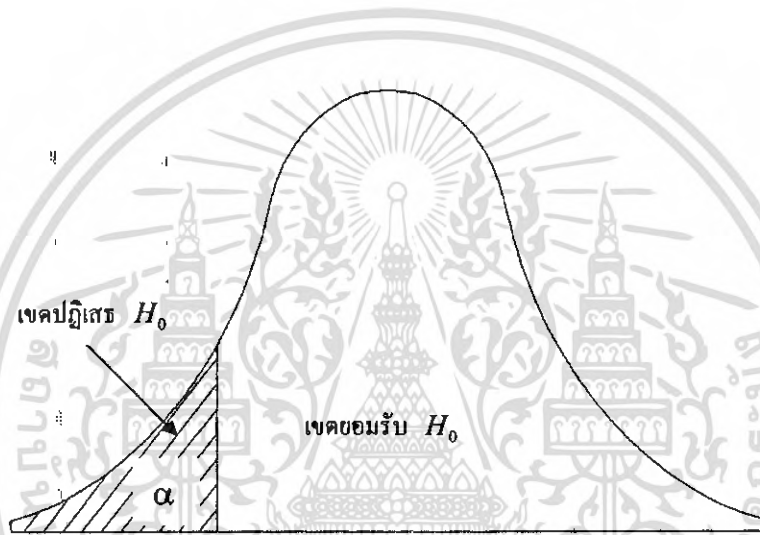
$H_0 : \mu_d = 0$ vs $H_1 : \mu_d < 0$

ตัวสถิติทดสอบคือ

$$t = \frac{\bar{d} - d_0}{S_d / \sqrt{n}}$$

เขตปฏิเสธ H_0

$t < t_{\alpha; n-1}$



รูปที่ 2-18 กราฟการแจกแจงแบบปกติแสดงเขตยอมรับ H_0 และเขตปฏิเสธ H_0 แบบข้างเดียวด้านซ้าย

2.8.4.3 การทดสอบแบบสองข้าง

สมมติฐาน $H_0 : \mu_d = d_0$ vs $H_1 : \mu_d \neq d_0$

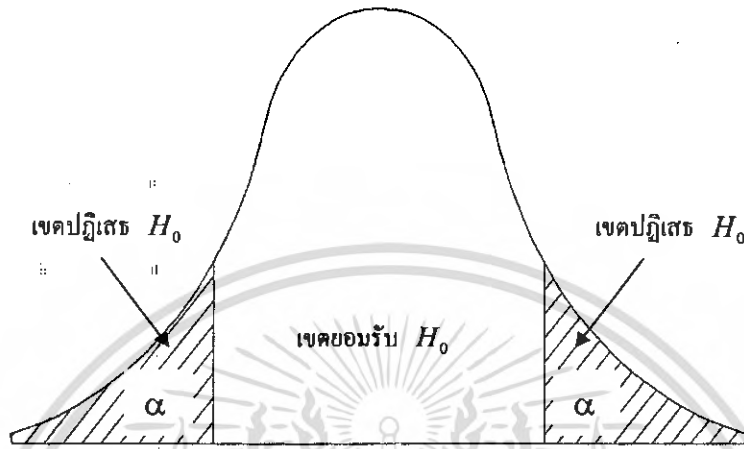
ถ้า $d_0 = 0$ สมมติฐานจะกลายเป็น

$H_0 : \mu_d = 0$ vs $H_1 : \mu_d \neq 0$

ตัวสถิติทดสอบคือ

$$t = \frac{\bar{d} - d_0}{S_d / \sqrt{n}}$$

เขตปฏิเสธ H_0 $t > t_{\frac{\alpha}{2}; n-1}$ หรือ $t < t_{\frac{\alpha}{2}; n-1}$



รูปที่ 2-19 กราฟการแจกแจงแบบปกติแสดงเขตยอมรับ H_0 และเขตปฏิเสธ H_0 แบบสองข้าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในการผลิตแม่พิมพ์นั้นต้องใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงสูง ซึ่งการขึ้นรูปด้วยวิธีทางกลแบบธรรมดาทำได้ยาก จึงต้องอาศัยกรรมวิธีการขึ้นรูปโดยการอัดฉีด

3.1.1 ชิ้นงานทดลอง

ในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์นิยมใช้วัสดุ DC53 และ SKD11 เป็นตัวขึ้นรูปชิ้นงาน แล้วใช้ทองแดงเป็นขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะนำมาประกอบในการทดลองครั้งนี้ โดยขึ้นรูปชิ้นงานเป็นแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดความกว้าง 30 มิลลิเมตร ความยาว 40 มิลลิเมตร ความสูง 30 มิลลิเมตร โดยใช้วัสดุ 2 ชนิดด้วยกัน

1. เหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 โดยมีส่วนผสมทางเคมี C = 1.00 wt% Si = 1.00 wt% Mn = 0.40 wt% P = 0.017 wt% S = 0.002 wt% Cr = 8.00 wt% Mo = 2.00 wt% V = 0.30 wt% และที่เหลือเป็นธาตุเหล็ก (Fe)
2. เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 โดยมีส่วนผสมทางเคมี C = 1.49 wt% Si = 0.28 wt% Mn = 0.39 wt% P = 0.017 wt% S = 0.009 wt% Cr = 12.05 wt% Mo = 0.80 wt% V = 0.21 wt% และที่เหลือเป็นธาตุเหล็ก (Fe)

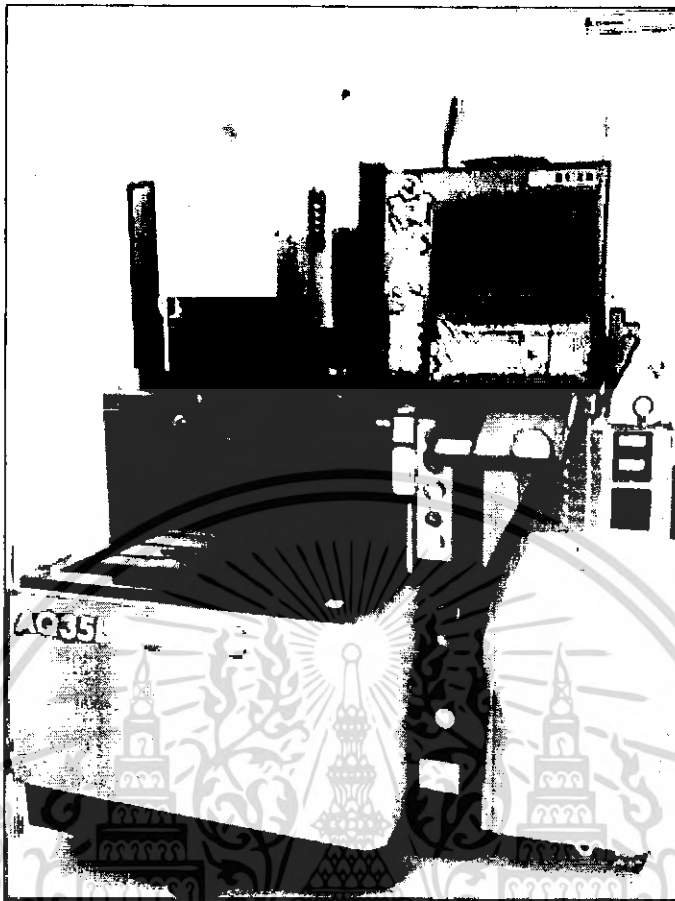
3.1.2 อิเล็กโทรด

อิเล็กโทรดมีหลายขนาดและหลายประเภท แต่ในการทดลองจะมีรูปร่างหน้าตัดวงกลมเป็นรูปทรงแท่ง กระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร โดยมีส่วนผสมทางเคมี Cr = 0.70 - 0.96 wt% Zr = 0.31 - 0.42 wt% และที่เหลือเป็นทองแดงบริสุทธิ์ (Cu)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องอัดฉีด

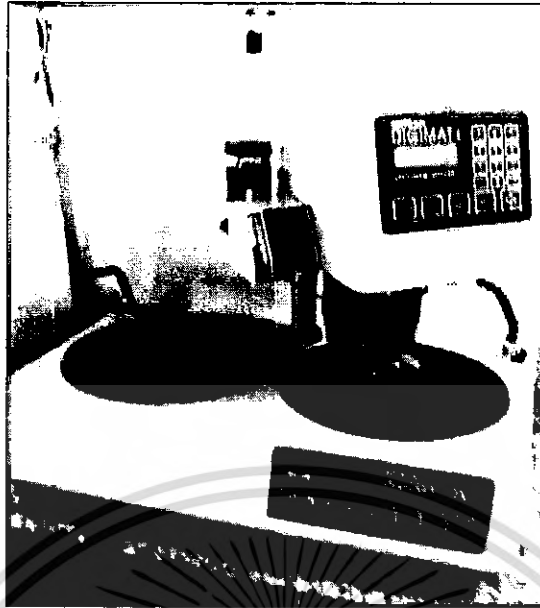
เป็นเครื่องยี่ห้อ Sodick รุ่น AQ35L มีระบบไฮดรอลิกในการขับเคลื่อน แกน XYZ และระบบควบคุมโดยใช้ระบบการสัมผัสบนหน้าจอแผงควบคุม ซึ่งเป็นระบบอัตโนมัติ ขนาดของโต๊ะเซอร์amik 600x400 มิลลิเมตร สามารถจับยึดอิเล็กโทรดหนัก 50 กิโลกรัม รับน้ำหนักของชิ้นงานได้สูงสุด 550 กิโลกรัม ช่วงยึดหยุ่นของชุดหัวจับจากล่างถึงบนสุด 212 มิลลิเมตร ถึง 462 มิลลิเมตร น้ำหนักของชุดเครื่องมือ 3900 กิโลกรัม ความดันอากาศ 0.65 เมกะปาสคาล ความยาวการเคลื่อนที่ของแกน X = 350 มิลลิเมตร Y = 250 มิลลิเมตร Z = 250 มิลลิเมตร



รูปที่ 3-1 เครื่องอิตีเอ็ม

3.2.2 เครื่องขัด

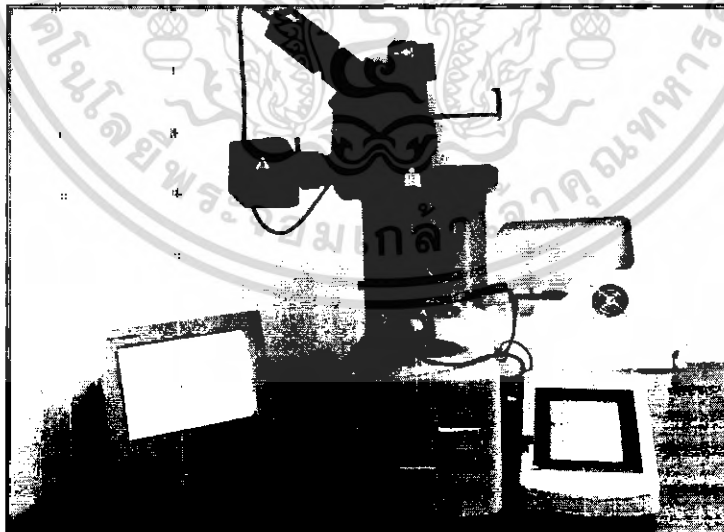
เครื่องขัดผิวโลหะให้ผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบมีความเรียบและได้ระนาบสม่ำเสมอ จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนหัวกดชิ้นงานทดสอบและงานหมุน หัวกดจะใช้แรงดันลมเป็นตัวกดชิ้นงานให้ติดกับกระดาษทรายหรือผ้าสักหลาดและมีแผ่นงานโลหะเป็นรูปวงกลมแบน โดยแผ่นงานจะมีเบ้าสำหรับใส่ชิ้นงานที่ต้องการขัดลงไป ใส่ชิ้นงานได้ครั้งละ 6 ชิ้น ยี่ห้อ Digimat+ Specimen Mover ส่วนงานหมุน มี 2 งาน มีลักษณะเป็นแผ่นงานแบนหน้าตัดวงกลมสำหรับใส่กระดาษทรายหรือผ้าสักหลาด ยี่ห้อ Digiset-2V Grinder-Polisher



รูปที่ 3-2 เครื่องวัดผิวชิ้นงาน

3.2.3 เครื่องวัดความแข็งชิ้นงาน

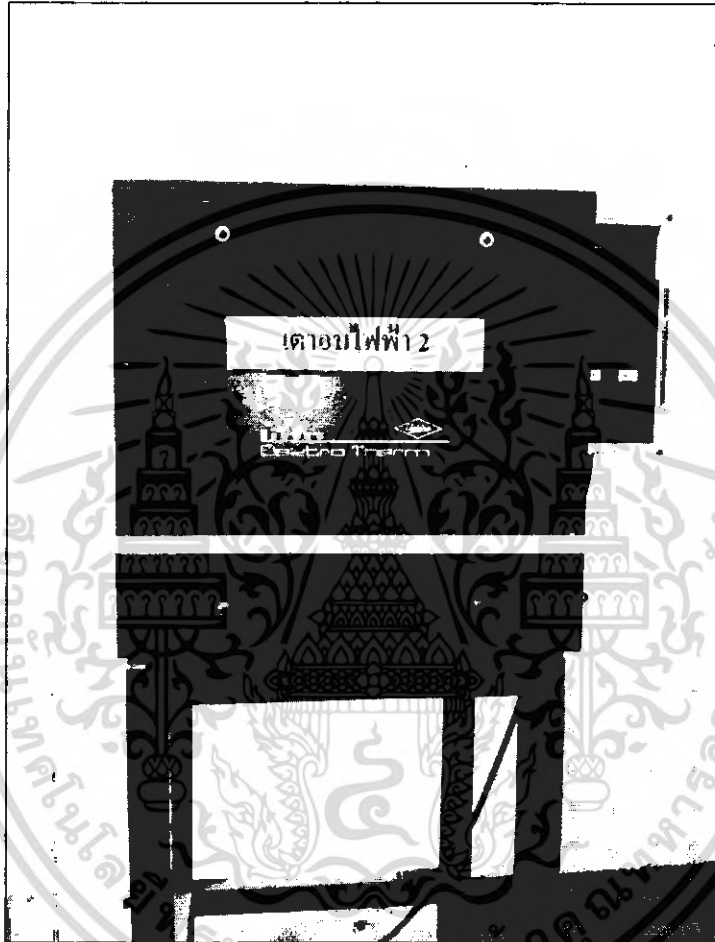
เป็นเครื่องวัดความแข็งของชิ้นงานแบบ Vickers Micro Hardness ยี่ห้อ Mitutoyo Model HM 113 มีความละเอียดของสเกลปรับระยะชิ้นงานในแนวแกน X และ Y 1 ไมโครเมตร โดยตัวเครื่องจะมีที่ยึดชิ้นงาน มีหัวกดเพชรลักษณะเป็นพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสกดให้ชิ้นงานเป็นรอย และมีกล้องสำหรับวัดเส้นทแยงมุมของรอยกดและคำนวณค่าความแข็งออกมา



รูปที่ 3-3 เครื่องวัดความแข็งชิ้นงาน

3.2.4 เครื่องอบชุบโลหะ

เป็นเครื่องอบ ยี่ห้อ Linn ของประเทศเยอรมัน ใช้ในกรรมวิธีทางความร้อนเป็นวิธีทำให้โลหะ หรือโลหะผสมเปลี่ยนโครงสร้าง เพื่อให้ได้คุณสมบัติหรือโครงสร้างจุลภาคเป็นไปตามข้อกำหนดที่ต้องการ ซึ่งสามารถให้อุณหภูมิสูง 1200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3-4 เตาอบไฟฟ้า

3.3 หลักการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

การออกแบบการทดลองโดยการใช้เครื่องอิตีเอ็มทำการสปาร์กในการทดลองครั้งนี้ ได้วางแผนโดยการใช้ตัวแปรในการทดลอง 2 ตัวคือ ON กับ IP เป็น 3 ระดับ และตัวแปรภายนอกคือ วัสดุที่ใช้ในการทดลอง 2 ชนิด เพื่อความถูกต้องได้ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จึงมีจำนวนครั้งในการทดลอง 54 ครั้ง

ในส่วนตัวแปรที่นอกเหนือจากตัวแปร ON และ IP จะกำหนดเป็นค่าคงที่ตลอดการทดลองทุกครั้งที่ทำ การทดลองโดยจะยึดตามค่ามาตรฐานของเงื่อนไข C100 (Condition C100) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ใช้สำหรับอิเล็กทรอนิกส์ทองแดงกับชิ้นงานเหล็กกล้าในการตัดเนื้อชิ้นงานโดยแสดงดังตารางที่ 3-1 และตัวแปรที่เป็นค่าคงที่อีกตัวก็คือ เวลาที่ทำการตัดชิ้นงานคือ 30 นาทีต่อชิ้น ซึ่งสามารถกำหนดได้โดยการป้อนจีโค้ดลงไปโปรแกรมควบคุมการตัด ส่วนการตั้งความเป็นขั้วจะให้อิเล็กทรอนิกส์เป็นขั้วลบ และชิ้นงานเป็นขั้วบวก

ตารางที่ 3-1 ตัวแปรที่สภาวะคงที่โดยกำหนดค่าคงที่ตลอดการทดลอง

Parameter	Function	ค่า
PL	Polarity	PL (-)
OFF	Electric discharge stop time	40
SV	Servo voltage	55
S	Servo speed	73
UP	Jump-up time	15
DN	Jump-down machining time	70
JS	Jump speed	20
LNS	Loran shape	0
STEP	Loran orbiting motion distance on one side	0
V	Main supply voltage	1
HP	Auxiliary power supply circuit control	40
PP	PIKADEN pulse. Shutoff	10
C	Capacitor	0
ALV	Arc detection level	15
OC	ON pulse control	0
LF	OFF pulse control	5
JM	Jump mode	0
LS	Loran speed and direction	0
LNM	Loran mode	0

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ค (IP) โดยมีระดับของตัวแปร 3 ระดับและวัสดุทดลอง 2 ชนิดคือ เหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 และ SKD11 ในส่วนของระดับของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองได้แสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ระดับของพารามิเตอร์ในการทดลอง

พารามิเตอร์	Level 1	Level 2	Level 3
ON Electric Discharge Time (μsec)	125	190	250
IP Electric Discharge Peak Current (A)	50	75	90
Materials	DC53		SKD11

ตารางที่ 3-3 การออกแบบและลำดับการทดลองของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53

ลำดับการทดลอง	พารามิเตอร์			Materials
	ON (μsec)	IP (A)	Code IP	
1	190	75	25	DC53
2	190	75	25	DC53
3	125	50	16.67	DC53
4	250	90	30	DC53
5	190	75	25	DC53
6	250	90	30	DC53
7	250	90	30	DC53
8	125	50	16.67	DC53
9	125	50	16.67	DC53
10	250	50	16.67	DC53
11	190	50	16.67	DC53
12	125	75	25	DC53
13	190	90	30	DC53
14	190	50	16.67	DC53
15	125	90	30	DC53
16	250	50	16.67	DC53
17	190	90	30	DC53

ตารางที่ 3-3 การออกแบบและลำดับการทดลองของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	พารามิเตอร์			Materials
	ON (μ sec)	IP (A)	Code IP	
18	125	75	25	DC53
19	125	75	25	DC53
20	250	50	16.67	DC53
21	190	50	16.67	DC53
22	190	90	30	DC53
23	250	75	25	DC53
24	250	75	25	DC53
25	125	90	30	DC53
26	125	90	30	DC53
27	250	75	25	DC53

ตารางที่ 3-4 การออกแบบและลำดับการทดลองของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11

ลำดับการทดลอง	พารามิเตอร์			Materials
	ON (μ sec)	IP (A)	Code IP	
1	190	50	16.67	SKD11
2	190	75	25	SKD11
3	125	50	16.67	SKD11
4	250	75	25	SKD11
5	190	50	16.67	SKD11
6	250	50	16.67	SKD11
7	190	50	16.67	SKD11
8	190	75	25	SKD11
9	125	90	30	SKD11
10	190	90	30	SKD11
11	125	50	16.67	SKD11
12	190	90	30	SKD11
13	250	75	25	SKD11
14	125	90	30	SKD11
15	250	75	25	SKD11

ตารางที่ 3-4 การออกแบบและลำดับการทดลองของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 (ต่อ)

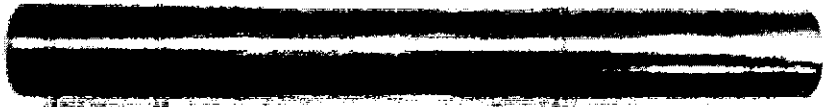
ลำดับการทดลอง	พารามิเตอร์			Materials
	ON (μ sec)	IP (A)	Code IP	
16	250	50	16.67	SKD11
17	125	75	25	SKD11
18	190	75	25	SKD11
19	250	90	30	SKD11
20	190	90	30	SKD11
21	125	75	25	SKD11
22	250	90	30	SKD11
23	250	50	16.67	SKD11
24	125	50	16.67	SKD11
25	125	75	25	SKD11
26	250	90	30	SKD11
27	125	90	30	SKD11

ในการเลือกการออกแบบการทดลองได้เลือกการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล จำนวนของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมี 3 ปัจจัย และต้องตัดสินใจว่าจะทำการบล็อกกิ้ง (Blocking) หรือ ทำการสุ่ม (Randomization) อย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ โดยในการทดลองนี้ได้เลือกทำการสุ่ม (Randomization) ลำดับการทดลองดังตารางที่ 3-3 และ 3-4

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 ขั้นตอนการเตรียมการทดลอง

1. เตรียมชิ้นงานทดลองทั้ง 2 ชนิด โดยผ่านกระบวนการขึ้นรูปทางกลทั้งการกลึง การกัด และการเจียรในให้มีขนาด ความกว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร และความสูง 30 มิลลิเมตร
2. เตรียมแท่งอิเล็กโทรด โดยผ่านการขึ้นรูปทางกลด้วยเครื่องกลึง ให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร และความยาว 100 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3-5

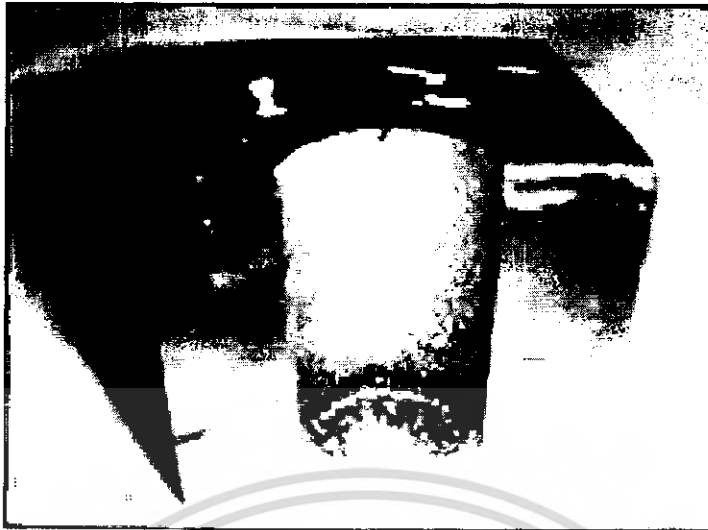


รูปที่ 3-5 แท่งอิเล็กทรอนิกส์

3. อบอุ่นชิ้นงานทดลอง เพื่อเป็นการขจัดความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานทดลอง หลังจากที่ได้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปทางกล ทำการอบอ่อนโดยนำชิ้นงานทดลองอบในเตาให้อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ หนึ่งชั่วโมงครึ่ง กลุ่มอะตอมที่ไม่อยู่ในสภาพสมดุลก็จะเริ่มกลับคืนสู่สภาพปกติ หรืออาจรวมตัวให้เกรนใหม่ที่ปราศจากความเค้น หลังจากทิ้งไว้ครบหนึ่งชั่วโมงครึ่งก็ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตา

3.4.2 ขั้นตอนระหว่างการทดลอง

1. ทำการจับยึดอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับเพลลาหัวจับของเครื่องอีดีเอ็ม ขึ้นให้แน่นพอสมควร
2. จับยึดชิ้นงานทดลองเข้ากับปากกาจับงานในอ่างที่ใช้บรรจุสาร ไดอิเล็กทริกและจัดตำแหน่งปากหัวกัดให้เข้าที่
3. ทำการตั้งศูนย์ปลายอิเล็กทรอนิกส์กับชิ้นงาน
4. ปลดปล่อยสาร ไดอิเล็กทริกให้ไหลเข้าสู่อ่างบรรจุ
5. ทำการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ตามแผนการทดลองที่ได้วางแผนไว้และเดินเครื่องอีดีเอ็ม
6. ให้เครื่องอีดีเอ็ม ทำงานตามโปรแกรม โดยใช้เวลา 30 นาที
7. เมื่อครบเวลาจึงปลดปล่อยสาร ไดอิเล็กทริกลงสู่ถังเก็บด้านล่างเครื่อง
8. ถอดอิเล็กทรอนิกส์ออกจากเพลลาหัวจับและนำชิ้นงานทดลองออกจากเครื่องอีดีเอ็ม
9. ทำความสะอาดชิ้นงานและนำชิ้นงานทดลองและอิเล็กทรอนิกส์ใหม่มาติดตั้งและทำการทดลองต่อ



รูปที่ 3-6 รูปชิ้นงานทดลอง

3.4.3 ขั้นตอนหลังการทดลอง

1. นำชิ้นงานที่ผ่านการทำงานด้วยเครื่องอีดีเอ็มเสร็จเรียบร้อยแล้ว มาทำการขัดกระดาษทรายเบอร์ 320 400 600 800 1000 ตามลำดับ
2. เช็ดให้แห้งทาน้ำมันป้องกันสนิม
3. นำชิ้นงานทดลองมาทำการวัดค่าความแข็งด้วยวิธี Vickers Micro Hardness Test (น้ำหนักกด 0.1 กิโลกรัม)
4. บันทึกข้อมูลต่างๆหลังจากที่ทำการวัดค่าความแข็ง
5. ทำการทดสอบชิ้นงานทดสอบชิ้นต่อไป
6. นำข้อมูลทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ความแปรปรวนในการทดลองนี้จะศึกษาถึงตัวแปรใดที่มีผลกระทบต่อระดับนัยสำคัญ ต่อความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 และ SKD11 โดยจะทำการพิจารณาจาก ตารางการวิเคราะห์ข้อมูล ANOVA โดยใช้ระดับความเชื่อมั่น 95 % แล้วทำการทดสอบสมมติฐานดังต่อไปนี้

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

แล้วนำค่าผลตอบสนองไปวิเคราะห์ความแปรปรวน วิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residuals) ด้วยโปรแกรม STATGRAPHICS Plus

7. สรุปผลการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลอง

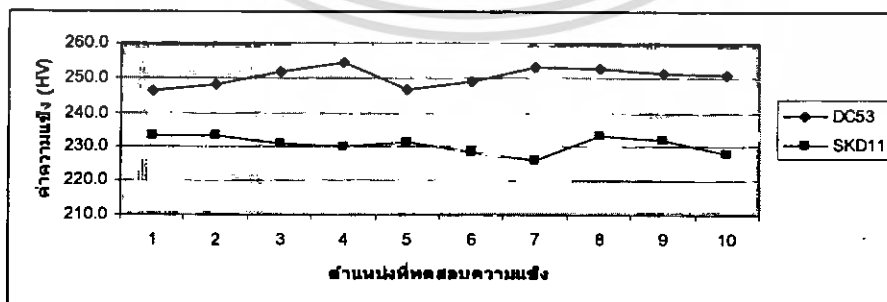
ในการทดลองด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปด้วยเครื่องอิตีเอ็ม โดยใช้ทองแดงผสมเป็นอิล็กโทรด และชิ้นงานประกอบด้วยเหล็กกล้าเครื่องมือ 2 ชนิด คือเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 และ DC53 โดยเหล็กกล้าเครื่องมือที่นำมาทดลองนั้นมีความแข็งก่อนการทดลองดังตารางที่ 4-1

ในการดำเนินการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ ทำได้โดยกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 3 ปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 4-2 และ 4-3 โดยจะมีปัจจัยภายในคือ ON กับ IP และปัจจัยภายนอก คือชนิดของเหล็กกล้า เพื่อทำการศึกษาค่าความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงานทดลอง เปรียบเทียบกันระหว่างเหล็กกล้า SKD11 และ DC53 ซึ่งทำการทดลองตามวิธีการทดลองที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3 ในการทดลองจะใช้ระยะเวลาคงที่ทุกการทดลองเป็นเวลา 30 นาที จะมีจำนวนครั้งของการทดลองทั้งหมด 54 การทดลอง

ตารางที่ 4-1 ผลการเก็บค่าความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 และ SKD11 ก่อนผ่านกรรมวิธีการอิตีเอ็ม

วัสดุทดลอง	ค่าความแข็งก่อนผ่านกรรมวิธีการอิตีเอ็ม (HV)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
เหล็กกล้าเครื่องมือ DC53	246.4	248.3	251.8	254.3	246.8	248.9	252.9	252.6	251.1	250.8
เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11	233.3	233.3	231.0	230.1	231.8	228.4	226.0	233.2	231.9	228.1

จากตารางที่ 4-1 ผลการเก็บค่าความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 และ SKD11 ก่อนผ่านกรรมวิธีการอิตีเอ็มได้เก็บข้อมูลมาจากการทดสอบความแข็งโดยใช้วิธีการทดสอบความแข็งแบบวิธี Vickers Micro Hardness โดยใช้แรงกดทดสอบเท่ากับ 0.1 กิโลกรัม โดยทำการกดทดสอบที่ผิวหน้าชิ้นงานทดลองที่ผ่านกรรมวิธีการปรับผิวเรียบโดยการเจียรไน และขัดด้วยกระดาษทรายมาแล้ว ส่วนตำแหน่งที่กดทดสอบจะอยู่ทั่วทั้งหน้าชิ้นงานทดลองโดยกระจายอยู่ 10 จุด ทั่วทั้งชิ้นงานทดลองแล้วนำค่าทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 4-1 ผลการเก็บค่าความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 และ SKD11 ก่อนผ่านกรรมวิธีการอิตีเอ็ม

4.1 ผลของการทดลองที่ได้จากเก็บค่าความแปรปรวนของเหล็กกล้าเครื่องมือ

ตารางที่ 4-2 ผลการเก็บค่าความแปรปรวนของเหล็กกล้าเครื่องมือ DCS3 หลังจากผ่านกรรมวิธีการเชื่อม

ลำดับการทดลอง	พารามิเตอร์		ระยะรอบทดสอบ (มิลลิเมตร)															
	ON (μsec)	IP (A)	Code IP	0.03	0.08	0.13	0.18	0.23	0.28	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.58	0.63	0.68	0.73
1	190	75	25	307.7	318.3	264.8	250.7	239.2	2333	241	244	244.9	237.9	240.2	257.9	250.4	239.6	241.7
2	190	75	25	310.1	258	256.8	252.9	261.4	250.7	253.2	250.5	255.9	254.1	253.2	256.1	253.6	258.1	255.9
3	125	50	16.67	262.7	249.6	247.3	235.8	265.8	249.2	258.5	253.6	256.8	251.6	251.9	245.3	249.8	252.2	250.2
4	250	90	30	362	255.8	245.9	245.6	255.6	243.6	253.6	236.3	241.3	265	278.3	278.3	271.8	245.6	242.8
5	190	75	25	307.9	302.1	257.1	252.5	257.3	255.7	255.9	256	258.4	253.5	259.9	251.9	251.2	251.6	258.1
6	250	90	30	352.8	345.1	346	330.3	312.4	306.2	297.7	296.2	284.6	299.3	291.8	299.7	288.6	295.6	284.1
7	250	90	30	369.6	283.2	271	277	278.6	285.6	284.7	279	281.3	273.8	299.8	298.4	294.5	289	279.9
8	125	50	16.67	270.9	276.4	246.7	254.4	248.7	254	246.8	252.9	257.9	249.1	260.6	258.4	247	255.2	253.7
9	125	50	16.67	278.2	276.7	275.9	275	245.6	239.2	234.8	250.4	255.1	248.3	249.1	244.3	252.4	247.6	248.6
10	250	50	16.67	334.4	244.6	246.3	241.3	242.1	244.2	264.4	253	248.1	259.8	256.4	265.8	252.4	259.2	261.2
11	190	50	16.67	273.2	238.8	245.8	245.8	235.4	245.1	253.2	266.2	260.2	243.3	248.4	269.3	253.1	252.5	241.2
12	125	75	25	299.9	265.6	279.4	276.5	275.6	267.2	264.8	261.4	254.1	258.3	259.3	255.9	256.5	259.1	255.2
13	190	90	30	306.4	244.1	242.3	243.2	252.4	249.8	245.1	247.3	246.5	251.9	252.3	241.1	233	253	242.6
14	190	50	16.67	289.2	253.9	246.2	229.3	236.7	238.6	244.9	233.1	242.1	247.2	241.6	241	244.6	248.2	242.7
15	125	90	30	294.7	235.3	238.2	242.5	250.2	246.2	237.6	243	234.8	246.9	238.4	241.7	239.3	253.8	241.8
16	250	50	16.67	343.5	261	244.8	243.7	270.3	259	239.6	257.1	254.8	279.5	273.8	256.5	251.8	289.5	254.7
17	190	90	30	292.3	240.7	240.4	249.9	234.7	234.8	239.6	243.4	251.4	247.9	259.6	252.2	248.5	237.2	254.3
18	125	75	25	284.3	239.2	241.3	243.2	255.2	250.3	252.7	246.1	255.7	251.5	249.2	242.9	251.4	244.2	251.2
19	125	75	25	278.5	243.1	248.1	236.1	252.1	246.2	249.5	253.1	246.6	250.9	242.2	240.6	232.9	246.6	244
20	250	50	16.67	335.8	243.7	249.7	237.7	267.9	260.9	245.1	261.1	259.2	255.7	241.9	249.5	263.5	240.3	257.4
21	190	50	16.67	317.3	248.8	242.4	244.2	245.3	257.6	253.7	245.5	248.7	257.9	251.3	250.5	254.4	237.2	252.7
22	190	90	30	298.7	286.4	292.1	285.4	289.9	289.6	290	262.4	264.2	257	262.4	251.8	250.2	264.2	255.8
23	250	75	25	368.6	273.6	245.7	244.4	250.4	253.6	245.9	239.9	243.6	245	248.1	250.5	242.6	251.3	243
24	250	75	25	356	255	252.3	250.5	238.2	241.3	245.7	251.1	255.9	252.9	250.4	247.4	240.2	248.9	250.4
25	125	90	30	292.8	265.4	257.8	245.6	239.6	248.7	246.1	251.3	243.1	246.9	247.5	237.5	244.3	248.6	241.8
26	125	90	30	280.5	266.5	268.5	261.3	261.2	253.1	257.7	255.6	254.6	257.8	260.9	256.2	256.7	256.9	251.3
27	250	75	25	365.2	284.1	251.7	253.5	247.2	240.1	251.9	263.1	241.3	255.4	256.5	253.6	264.3	245.7	250.4

ตารางที่ 4-2 ผลการเก็บค่าความแจ่มของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC33 หลังจกผ่านกรรมวิธีการฮีตตี๋ม (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	พารามิเตอร์		ระบรอกทดสอบ (มิลลิเมตร)																
	ON (μsec)	IP (A)	Code IP	0.78	0.83	0.88	0.93	0.98	1.03	1.08	1.13	1.18	1.23	1.23	1.73	2.23	2.73	3.23	3.73
1	190	75	25	244.2	247.3	240.8	246.8	246.9	253.7	253.9	254.3	251.4	248.8	247.9	250.5	251.7	252.3	253.7	253.7
2	190	75	25	254.4	254	253.2	259.2	265.1	247.4	252.4	255.8	253.7	250.8	250.3	250.8	251.2	250.1	248.7	248.7
3	125	50	16.67	257.1	258.6	247.3	256.2	258.2	250.9	255.7	257.8	255.5	250	243.4	242.3	245.2	245.8	246.3	246.3
4	250	90	30	246.9	235.1	267.9	239.6	241.6	256.5	255.5	246.6	245.5	248.6	248.7	249.5	251.5	251.9	249.4	249.4
5	190	75	25	259.3	255.5	255	254.4	251.6	248.8	251.2	250.9	252.1	250	250.3	250.1	250.9	251.5	251.1	251.1
6	250	90	30	283.4	281.5	286.7	280.9	297.4	285.7	274.9	270.3	269.1	264.5	253.1	254.1	253.9	253.5	254.9	254.9
7	250	90	30	292.5	289.7	293.6	302.7	289.7	293.5	255.1	252.3	251	251.8	253.8	252.1	254.1	253.2	253.7	253.7
8	125	50	16.67	259.6	262.6	263.5	255.1	253.3	254.2	259.1	246.7	253.5	257.5	247	248	248.8	247.3	247.2	247.2
9	125	50	16.67	227.7	238.5	254.4	253.1	241.2	248.7	247.2	251.2	255	253.2	250.6	251.5	249.6	250.1	251	251
10	250	50	16.67	244	263	243.7	252.3	247.7	253.9	253.5	254.5	252.5	252.7	251	249.9	250.1	250.2	249.5	249.5
11	190	50	16.67	244.4	242.3	245.6	241.2	240.4	256.6	250.6	249.6	250.3	253.3	242.7	243.5	242.6	244.3	243	243
12	125	75	25	259.1	261.2	262.3	261.5	257.1	249.7	249.6	251.5	247.9	251.5	251.4	250.5	251.5	252.4	249.9	249.9
13	190	90	30	249.5	237.4	268	230.5	255.7	250.4	251.9	252.8	251.5	251.3	250.3	250.9	251.5	250.2	249.9	249.9
14	190	50	16.67	251	241.3	248.1	247.6	257.2	250.7	249.5	248	246.3	243.4	244.6	245.1	244.3	245.1	245.6	245.6
15	125	90	30	250	239.5	249.1	242.9	242.1	249.3	250.2	252.5	252.3	252.3	256.6	253.5	249.2	250.4	249.9	249.9
16	250	50	16.67	238	259.8	250.2	250.4	240.2	256.2	252.1	254.8	250.4	250.8	248.8	249.9	250.4	251.9	251.3	251.3
17	190	90	30	246.6	264.3	242.7	256.1	251.4	250.1	250.9	251.2	252.2	251.8	249.6	251.5	250.9	250.2	251.4	251.4
18	125	75	25	246.9	253.8	259	250.4	251.3	250.5	255.7	255.8	250.8	250.6	253.3	251.4	250.4	252.8	250.6	250.6
19	125	75	25	244.1	235.6	238.7	247.7	247.8	247.7	249.1	250.3	255.6	250.2	251	251.9	251.9	252.5	250.3	250.3
20	250	50	16.67	243.6	249.6	261.7	245.3	267.4	256.9	254.3	250.3	252.6	252.6	250.2	249.8	250.4	251.2	250.5	250.5
21	190	50	16.67	250.9	250.3	254.7	251.4	254.3	253.5	250.5	244.7	246.2	245.8	244.5	245.1	244.9	244.3	244.1	244.1
22	190	90	30	262.5	259.8	256.6	256	256.1	251.5	252.1	252.2	250.2	253	251.6	253.2	252.9	252.1	252.5	252.5
23	250	75	25	248.3	244.6	246.4	260.7	253.9	244.2	247.4	250.9	249.1	245.3	251.6	250.5	250.9	251	251.3	251.3
24	250	75	25	256.7	250.5	246.3	250.4	249.4	256.5	253.1	255.7	251	249.2	255.9	254.1	251.2	250.4	250.8	250.8
25	125	90	30	243.6	247.9	245.1	242.2	245.5	253.4	252.5	251.6	253.9	251.8	253.5	251.4	250.2	251.8	251.1	251.1
26	125	90	30	249.7	250.6	251.3	254.4	249.7	259.5	257.9	259.8	260.1	257.1	254.7	256.1	254.9	255.2	253.3	253.3
27	250	75	25	252.3	260.8	268.6	252.2	258.2	243.8	245.6	242.9	243.5	244.6	242.9	242.5	244.1	243.1	243.5	243.5

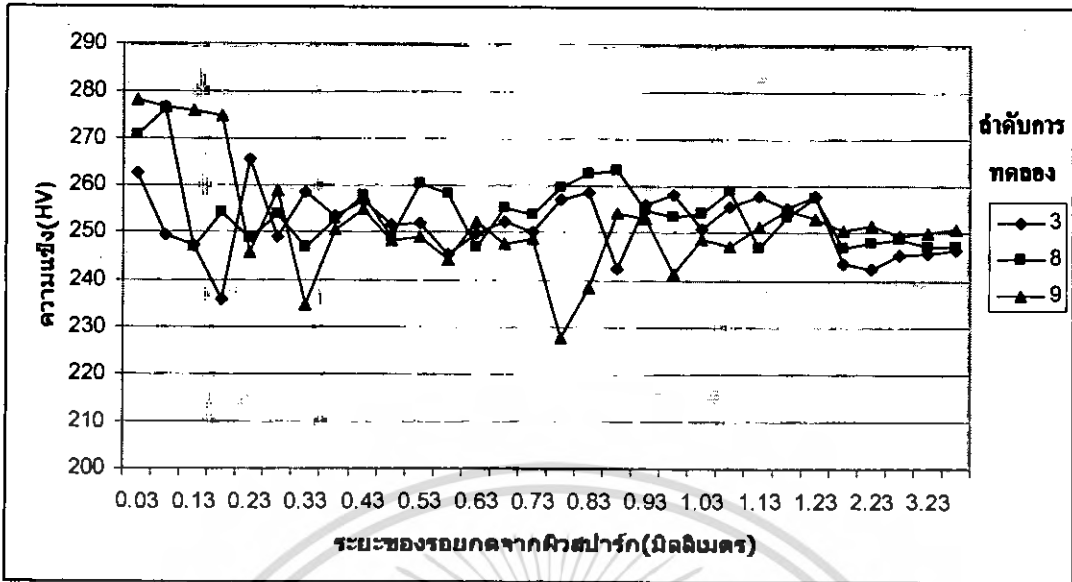
ตารางที่ 4-3 ผลการเก็บค่าความถี่ของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 หลังจากผ่านกรรมวิธีการตีเต็ม

ลำดับการทดสอบ	พารามิเตอร์		ระยะรอบยกทดสอบ (มิลลิเมตร)															
	ON (μsec)	IP (A)	Code IP	0.03	0.08	0.13	0.18	0.23	0.28	0.33	0.38	0.43	0.48	0.53	0.58	0.63	0.68	0.73
1	190	50	16.67	237	222.8	230.3	224	234.3	229.7	236	229	223.4	223	231.7	231.6	227.2	224.1	222.7
2	190	75	25	258.8	242.8	237.6	239.5	245.8	245	231.1	251.4	246.2	242.1	242.7	245.8	235.9	237.1	239.9
3	125	50	16.67	246.7	232	243.2	237.2	231.5	220.5	231.5	234.1	236.4	227.6	234	240.8	235.8	239.4	234.7
4	250	75	25	275.5	239.3	232.2	222.7	232.3	229.5	221.1	235.6	227.4	232.9	231.1	231.4	208.1	231.9	227.3
5	190	50	16.67	273.4	226.7	235.8	228.2	222.3	224.9	227.4	225.5	229.6	221.9	228.9	236.1	230.3	229.1	231.8
6	250	50	16.67	271.1	235.4	233.2	240.1	235.7	235.3	227.5	238.3	236.8	234.5	232.9	232	235.8	231.2	236
7	190	50	16.67	282.6	218.4	218.7	222.9	220.4	227	220.2	218.9	222.2	223.4	226.7	220.9	215.6	212.9	213
8	190	75	25	286.9	237	230.2	259.7	238.5	222.2	233.4	239.8	237.3	233.1	238.8	236.8	232.1	236.4	231.7
9	125	90	30	285.1	218.7	224.8	219.1	215.1	214.6	220.8	214.9	208.9	219.8	210.5	212.9	230	218.8	221.4
10	190	90	30	262.3	221.4	221.5	215.5	201.1	209.9	216.9	211.5	218.8	217.8	221.2	219	214.6	213.7	220.1
11	125	50	16.67	280	236.6	232.9	234.6	231.5	222.2	231	225.9	235.3	241	228.7	228.3	230.4	238.4	231.3
12	190	90	30	283.4	217	214.8	215.4	213.3	213.5	212.1	224.7	224.1	224.6	218.7	219.7	217.7	208	208.8
13	250	75	25	305.2	227.3	244	219.5	229.9	228	229.3	230.1	229.6	223	233.6	227.4	213.4	228.4	240.8
14	125	90	30	297	213.2	219.5	216.1	217.8	216	221.1	216.8	223	223.5	222.3	224.8	225.5	228.8	223.1
15	250	75	25	308	236.4	227.3	236.9	244.4	261.6	241.4	243.8	249.9	251.3	241.7	246.8	255.4	242.4	247.2
16	250	50	16.67	342.8	237.7	223.7	219.4	224.6	231.8	233.8	231	223.3	221.9	223.3	223.1	222.2	229.6	228.3
17	125	75	25	330.4	227	220.6	218.4	222.1	232.6	222.8	216.1	220.8	224.5	218.7	225.8	227.9	219.9	223.6
18	190	75	25	330.9	222.6	231.1	227.5	232.6	233.5	234.6	221.4	230.1	220.1	231.9	219.8	221.4	217.7	223.1
19	250	90	30	321.2	247.6	234.9	238	234.8	234.7	230.1	239.4	234.8	237.6	234.5	230.9	235.2	235	238.3
20	190	90	30	327.8	209	210.1	215.1	210	213.8	216.8	215.8	206.7	221.1	209.6	207.3	216.2	215.2	219.9
21	125	75	25	335	232.5	242.5	235.5	242.6	240.2	234.6	242.9	224.9	247.2	240.7	225.3	228.6	226.8	231.8
22	250	90	30	330.8	248.7	232.1	237.6	231.3	233.8	237.9	251.4	239.6	237.4	220.3	223.5	232.1	235.3	240.5
23	250	50	16.67	334.1	225.4	223.6	227.8	225.7	223.3	236.9	226.4	231.8	238.6	227.6	231.2	238.7	225.8	224.9
24	125	50	16.67	333.3	258.6	246.1	236.8	237.2	226	237.6	233.6	230.6	234.5	239.1	233.2	236.2	230.4	237.6
25	125	75	25	380.9	250.8	220.2	215.9	223.4	228.6	225.5	224.7	232	227.6	227.1	224	218	216.3	219
26	250	90	30	364.4	239.8	225.4	232.6	238.5	241.4	230.5	247.2	249.1	239.2	239	241.5	238.5	229.7	243.7
27	125	90	30	373.5	276.2	251.6	244.2	241.5	245.5	247.1	244.5	237	238.1	230.7	238	235.8	238.9	234.6

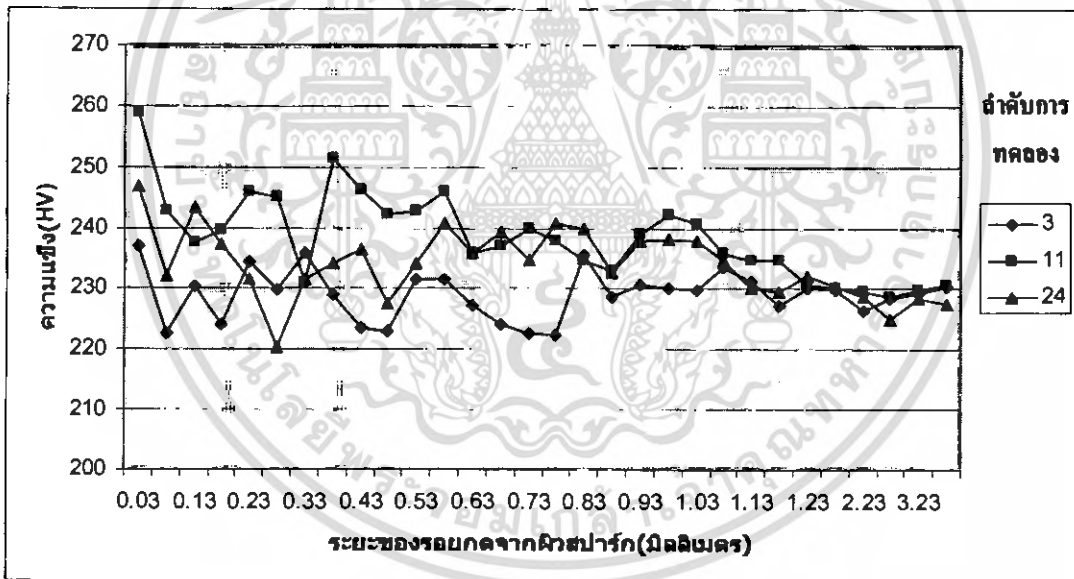
ตารางที่ 4-3 ผลการเก็บค่าความแรงของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 หลังจากผ่านกรรมวิธีการฮีตตี๋ม (ต่อ)

ลำดับการทดสอบ	พารามิเตอร์		ระยะรอยกดทดสอบ (มิลลิเมตร)															
	ON (μsec)	IP (A)	Code IP	0.78	0.83	0.88	0.93	0.98	1.03	1.08	1.13	1.18	1.23	1.73	2.23	2.73	3.23	3.73
1	190	50	16.67	222.4	235.6	228.8	230.8	230	229.7	233.6	231.2	227.3	230.2	229.7	226.4	228.3	229.2	230.5
2	190	75	25	238	234.6	233	239.1	242.2	240.6	235.9	234.7	234.6	230.7	230	229.5	228.8	229.9	230.8
3	125	50	16.67	240.6	239.8	232.8	238	238.1	237.9	234.6	230.1	229.5	232.1	230.4	228.7	224.9	228.3	227.5
4	250	75	25	222.3	220.6	216.2	219.1	233.8	221.2	223.3	221.2	225.4	217.6	222.4	226.5	227.2	226.1	223.7
5	190	50	16.67	223.7	229.8	232.7	235.4	228.2	224.2	230.1	232.2	230.9	229.5	227.6	230.4	231.2	231.9	229.3
6	250	50	16.67	230.7	230.5	235.8	235.6	225.7	231.1	229.8	234.4	230.3	234.6	227.6	229.1	227.5	230.2	228.7
7	190	50	16.67	215.9	223.3	239.4	222	219.4	222	228.5	226.9	229.9	231	227.5	230	231.4	228.7	227.1
8	190	75	25	238.4	237.2	237.6	232.4	238.7	231.3	232.1	237.2	236.8	236.3	237.1	230.8	232.8	232	235.8
9	125	90	30	210.4	212	226.4	229.2	229.5	221.4	230.7	226.9	229.2	223.8	227.4	229.5	227.8	225.9	228
10	190	90	30	215.6	219.8	216.8	218.2	233.8	225.1	230.2	227.8	229.7	229.1	228.4	231.1	230.6	228.4	229
11	125	50	16.67	231.5	227.3	236.6	233.7	228.6	233.4	228.5	226.4	230	228.7	228.2	231.4	232.3	229.9	230.1
12	190	90	30	222.8	221.3	218.3	217	210.9	224.3	227.7	226.7	228.2	224.1	223.5	229.5	230.1	229	226.3
13	250	75	25	240.8	231.7	224.2	232.1	237.4	231	226.4	235.4	231.8	227.6	225.5	229.1	231.2	228.4	230.3
14	125	90	30	222.4	227.4	231.5	223.1	217.3	227.5	230.6	225.9	226.2	226.6	225	227.3	228	231.5	227.6
15	250	75	25	249.8	239.3	245.6	247.5	224.1	233.4	228.1	233.9	229	231.9	230.4	232.6	233.5	229.4	229.7
16	250	50	16.67	229	224.6	220.5	228.2	223.7	232.2	228.4	231.6	233.3	231.5	229.5	231.9	233.7	228.2	230.7
17	125	75	25	230.1	229.4	220.1	226.8	222.9	223.1	228.6	227	233.2	231.9	232.7	229.5	230.1	228.1	230.3
18	190	75	25	222.2	220.6	223.1	219.9	224.1	230.3	224.4	231	229.7	234.9	233.2	231	228.9	230.6	227.6
19	250	90	30	237.4	230	230.7	238.6	237.2	235.4	232.8	238.2	233.1	235.4	235.7	229.6	232.7	231	234.6
20	190	90	30	219.8	212.9	221.6	218.3	218.6	218.7	222.6	224	219.9	223.7	222	221.5	220.2	223.4	220.8
21	125	75	25	227.2	222.8	225.6	218.9	219.6	239	237.8	240.5	239	241.5	237.2	235.5	237.3	235.5	238.1
22	250	90	30	229.3	243.1	243.1	229.5	231	226.2	229.3	226.8	230.2	229.1	228.2	229	232.4	230.4	230.9
23	250	50	16.67	234.5	229.1	238.7	235.1	227.4	236.5	231	232.2	230.8	233.6	232.3	229.7	231.5	230.6	233.4
24	125	50	16.67	236	233.1	231	231.2	232.9	239.3	235.4	241.1	233.2	240.5	238.2	236.1	232.8	235.7	237
25	125	75	25	212.4	223.6	232	224.8	211	216.9	218.4	220.8	225	226.4	222.5	223.1	228.2	224.7	226.4
26	250	90	30	232.4	247.2	243.7	234.1	237.5	231.6	235.7	232.1	231.8	229.8	232.4	229.9	233.1	231.5	229
27	125	90	30	238.2	232.5	233.3	233.2	230.9	236.6	235.6	230.7	233.5	233.8	232.1	231.9	235.5	230.8	232.4

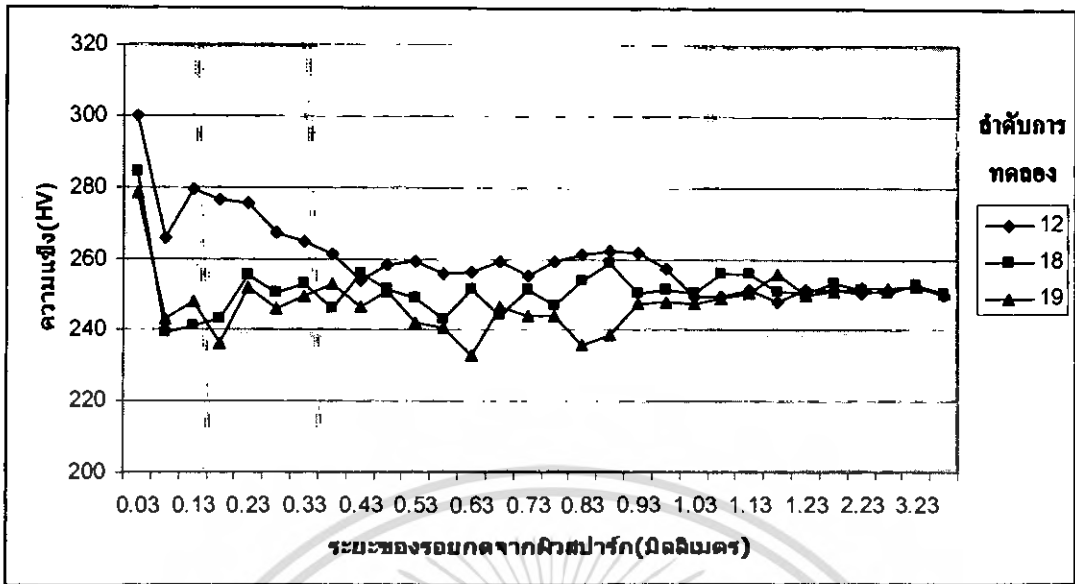
หมายเหตุ Code IP เป็นค่าที่ป้อนใส่เครื่องเพื่อให้ได้ค่า IP จริงที่ต้องการ



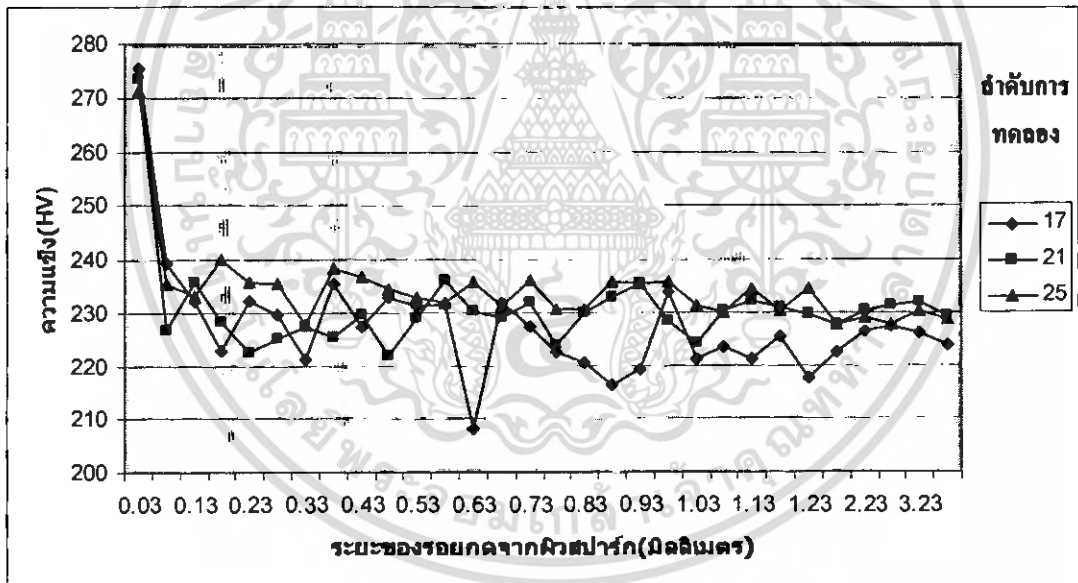
รูปที่ 4-2 ค่าความแข็งและระยะรอมกจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 125, IP = 50, วัสดุทดลอง DC53



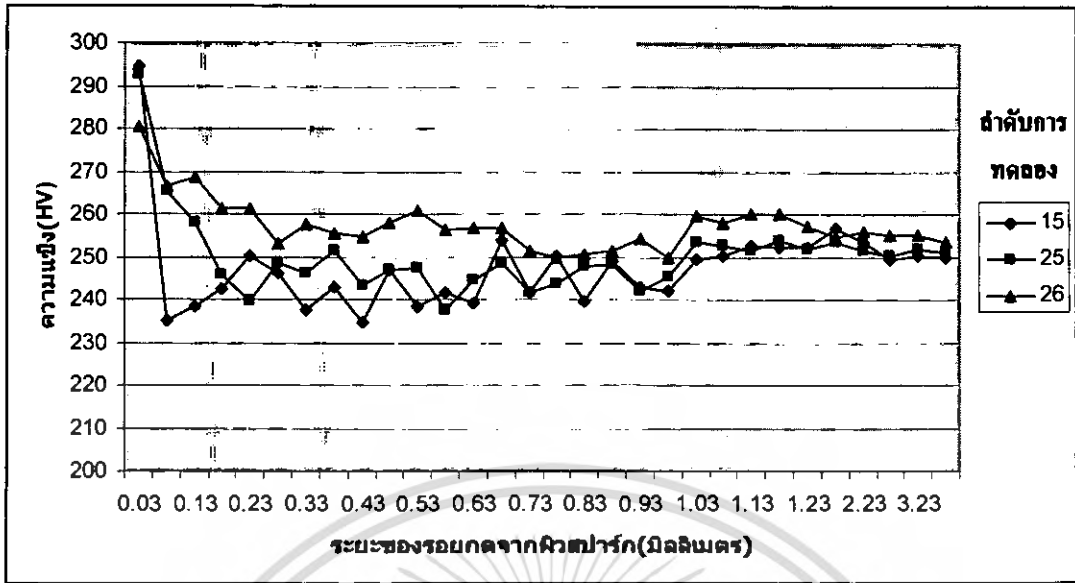
รูปที่ 4-3 ค่าความแข็งและระยะรอมกจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 125, IP = 50, วัสดุทดลอง SKD11



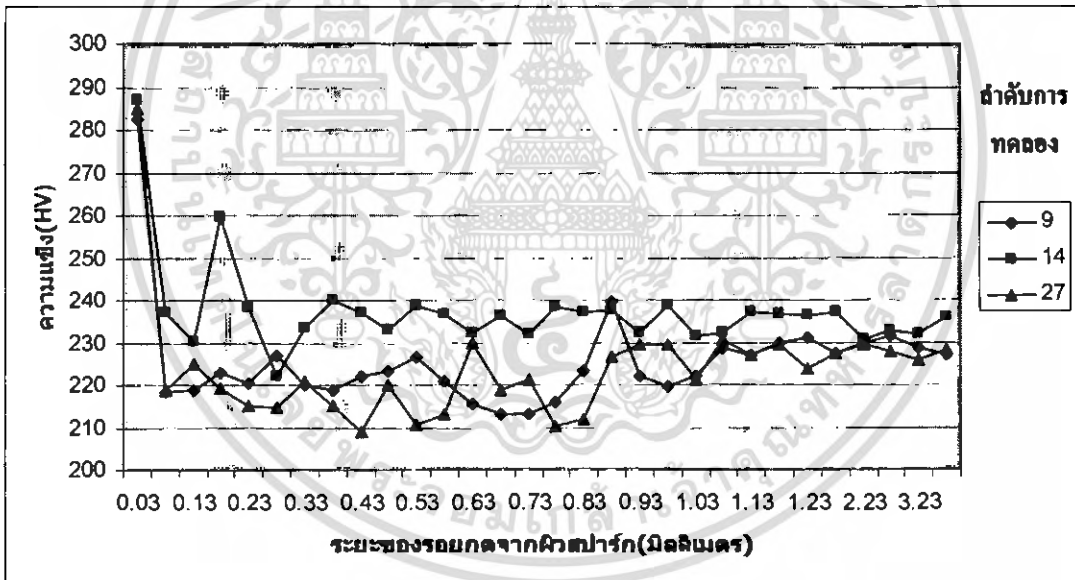
รูปที่ 4-4 ค่าความแข็งและระยะรอกคจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 125, IP = 75, วัสดุทอลอง DC53



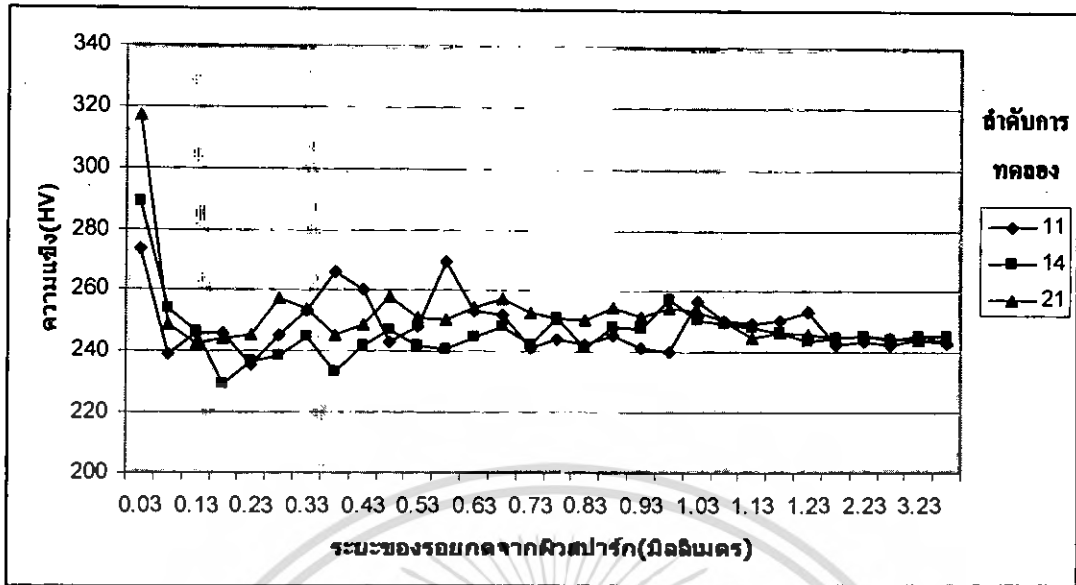
รูปที่ 4-5 ค่าความแข็งและระยะรอกคจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 125, IP = 75, วัสดุทอลอง SKD11



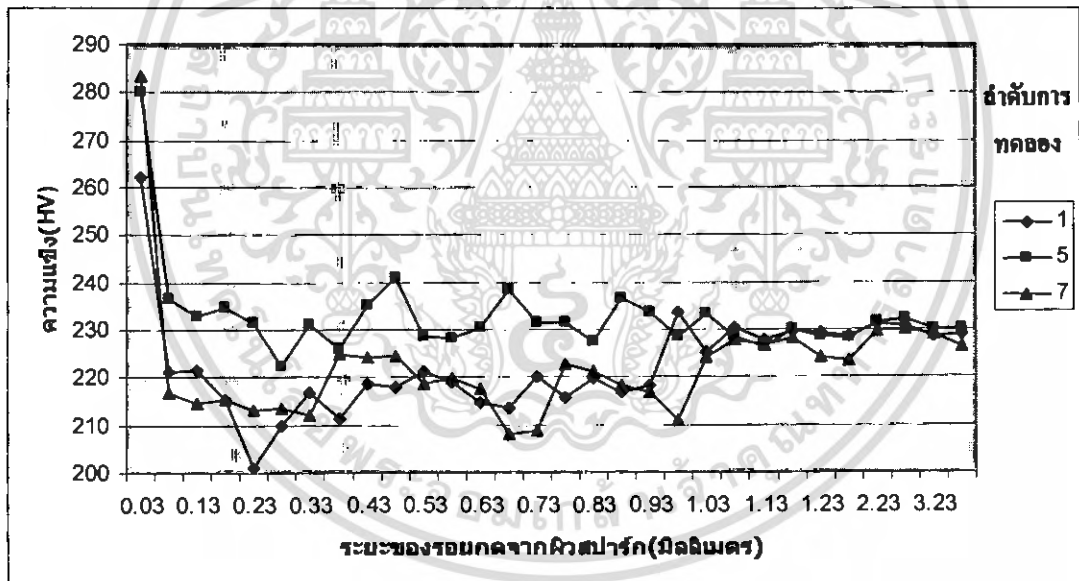
รูปที่ 4-6 ค่าความเข้มและระยะรอมกตจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 125, IP = 90, วัสดุทดลอง DC53



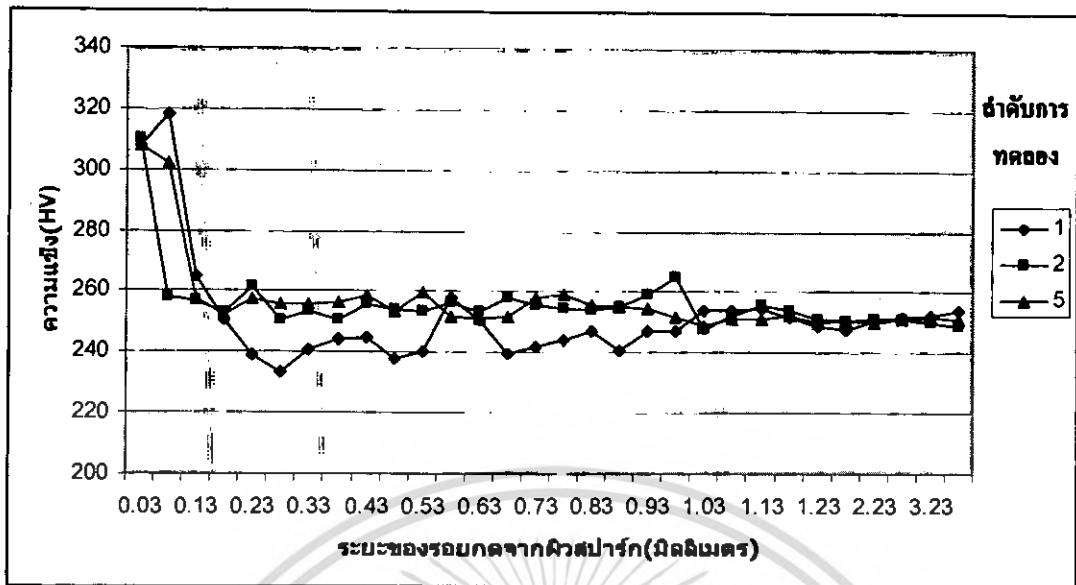
รูปที่ 4-7 ค่าความเข้มและระยะรอมกตจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 125, IP = 90, วัสดุทดลอง SKD11



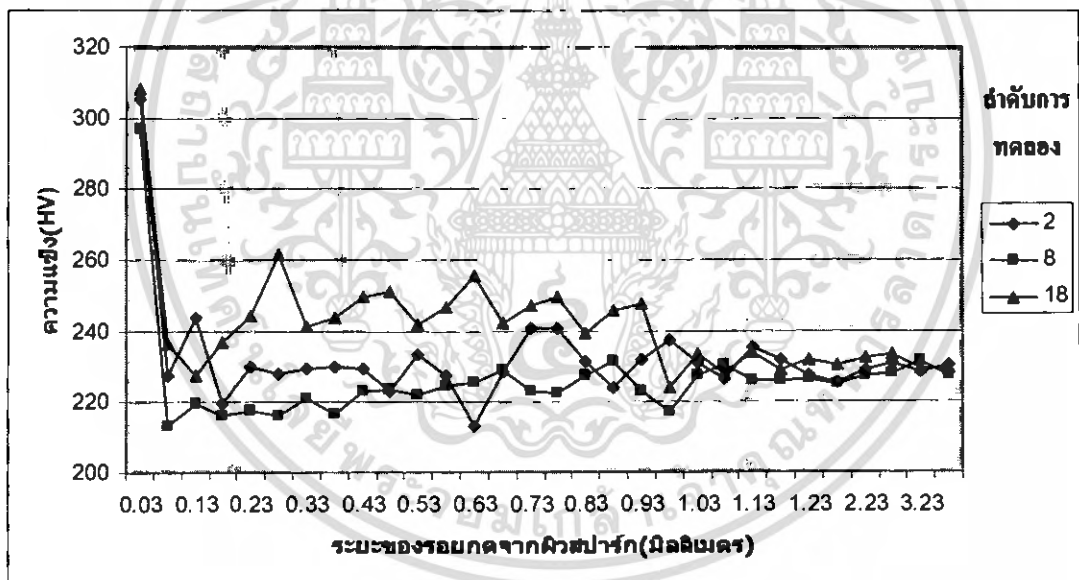
รูปที่ 4-8 ค่าความแรงและระยะรอมกจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 190, IP = 50, วัสดุทอลอง DC53



รูปที่ 4-9 ค่าความแรงและระยะรอมกจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 190, IP = 50, วัสดุทอลอง SKD11

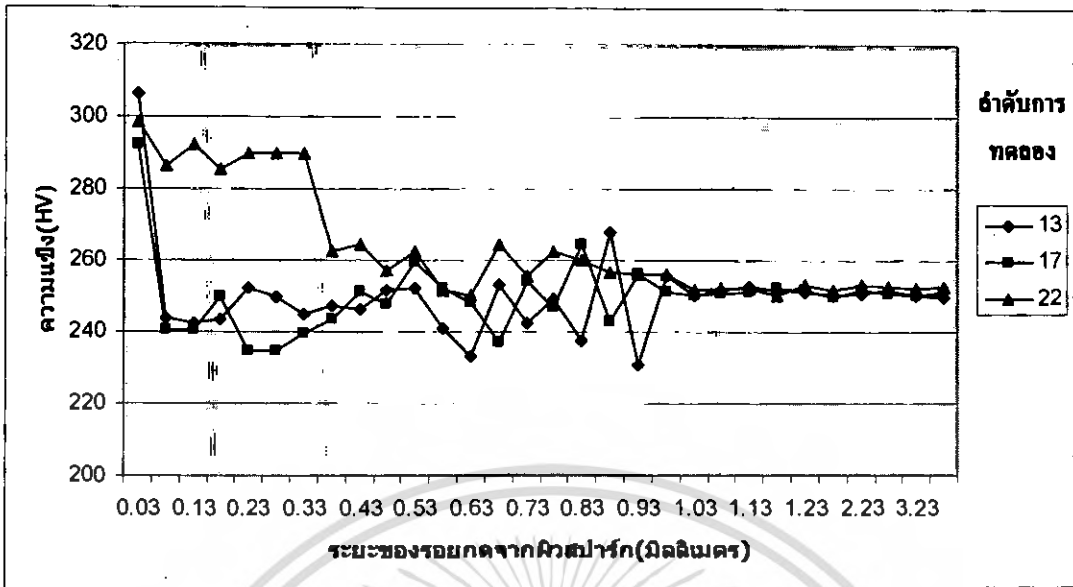


รูปที่ 4-10 ค่าความแข็งและระยะรอมกคจากหัวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 190, IP = 75, วัสดุหลอด DC53

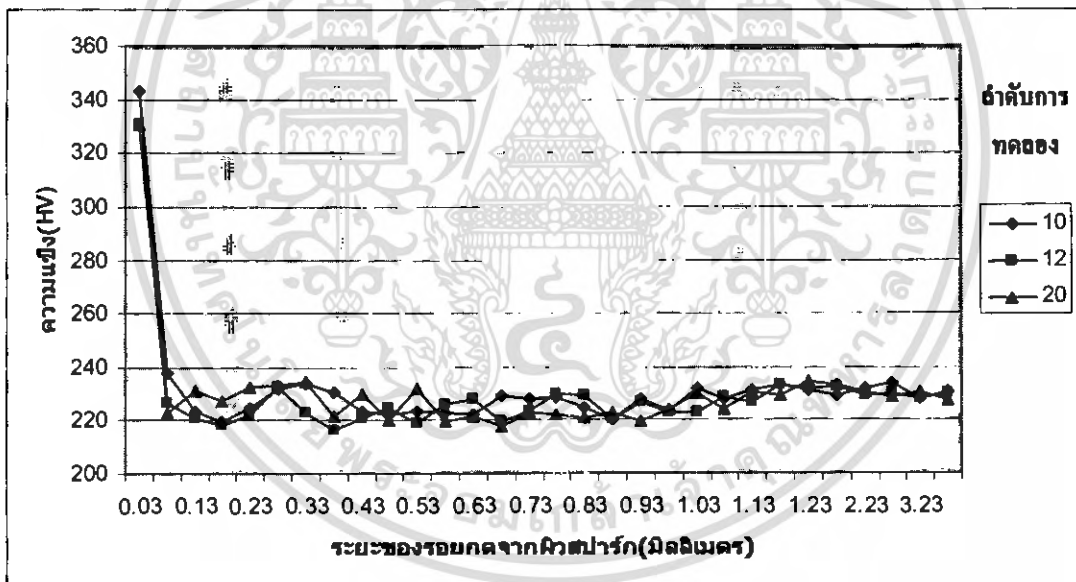


รูปที่ 4-11 ค่าความแข็งและระยะรอมกคจากหัวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 190, IP = 75, วัสดุหลอด SKD11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

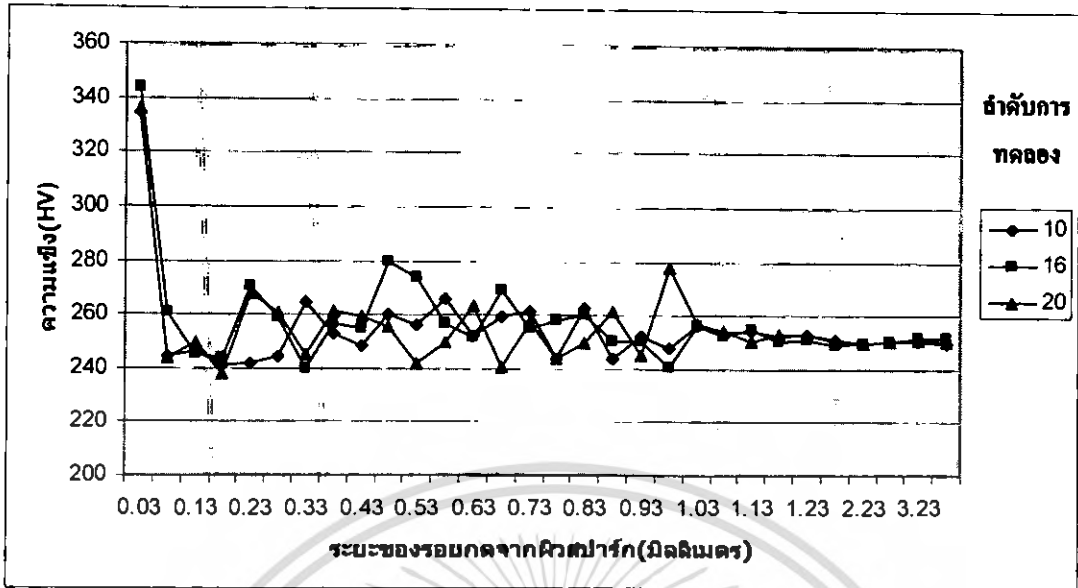


รูปที่ 4-12 ค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 190, IP = 90, วัสดุทดลอง DC53

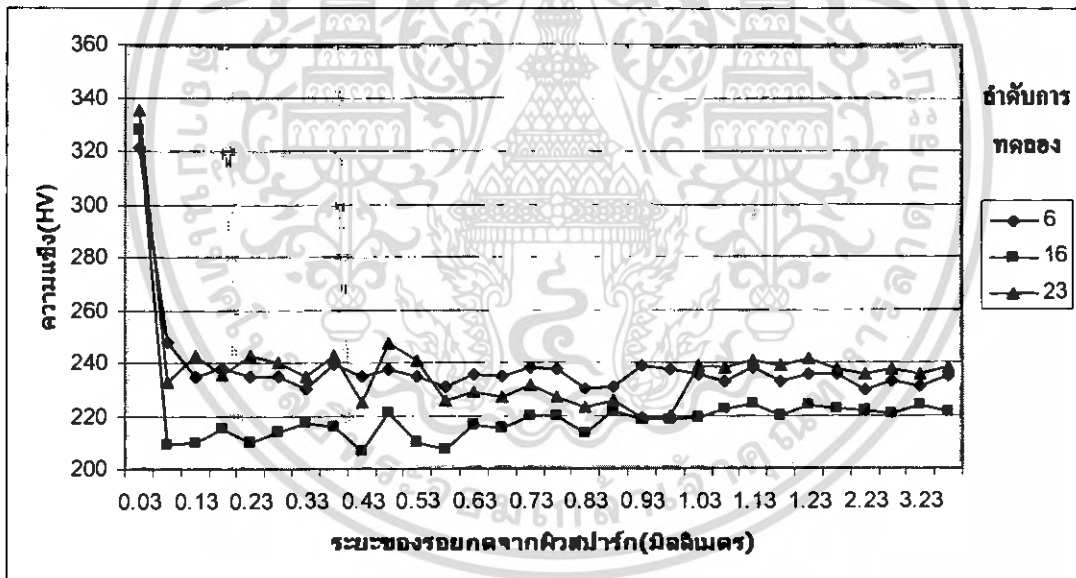


รูปที่ 4-13 ค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 190, IP = 90, วัสดุทดลอง SKD11

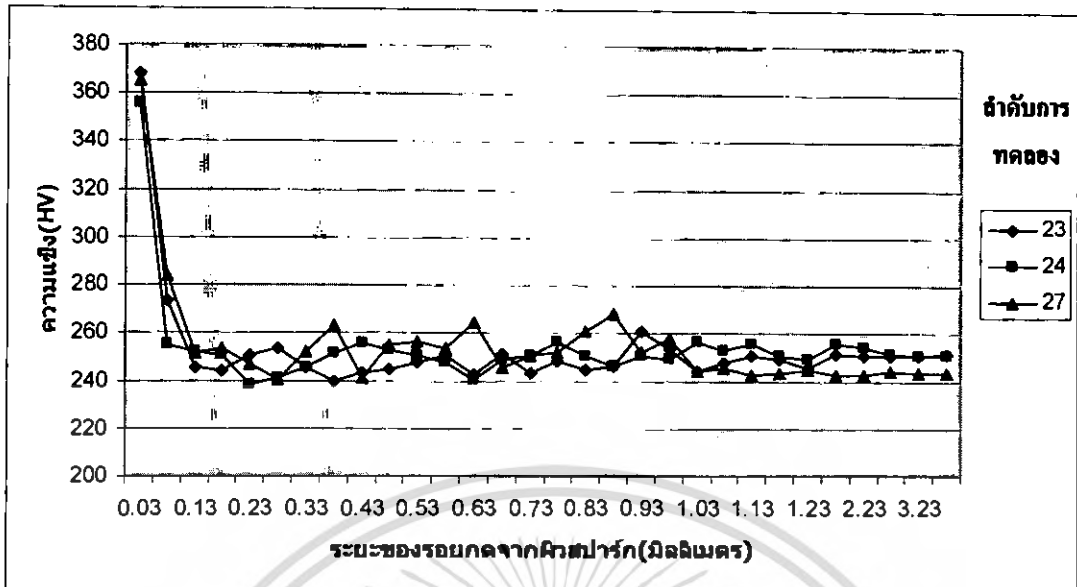
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



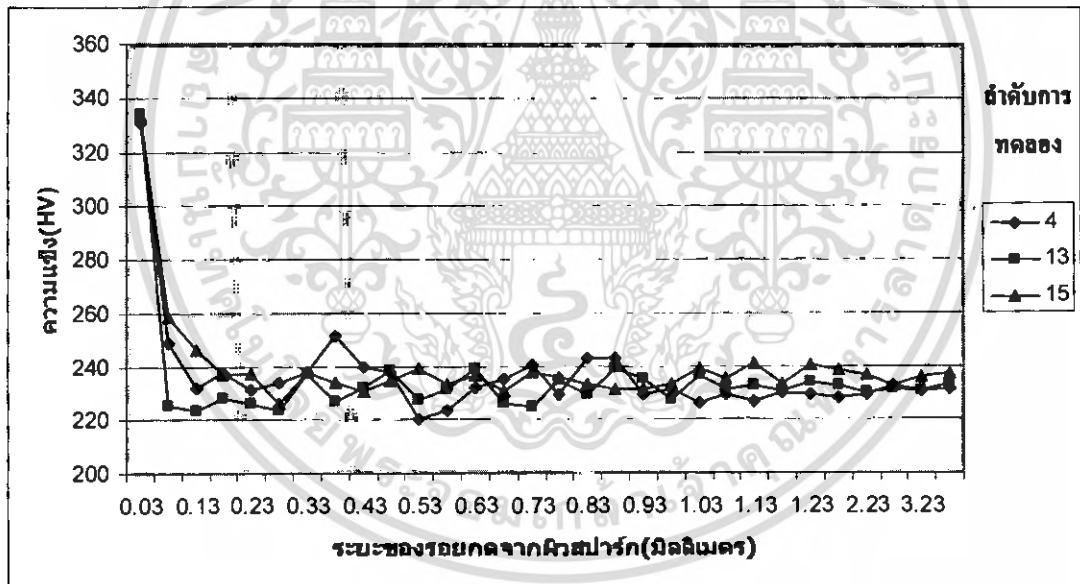
รูปที่ 4-14 ค่าความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 250, IP = 50, วัสดุทลอง DC53



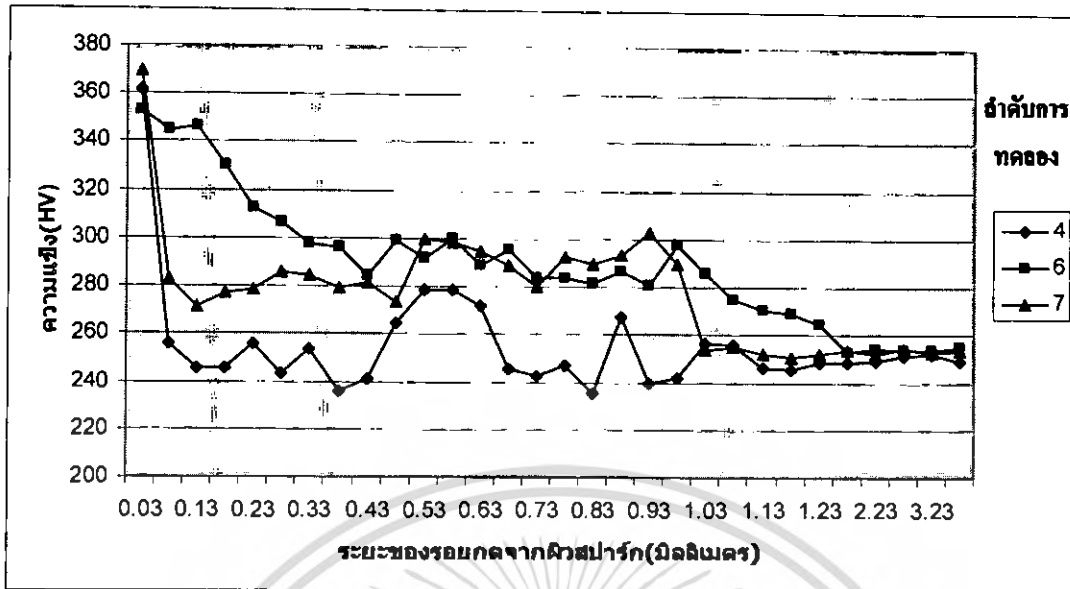
รูปที่ 4-15 ค่าความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 250, IP = 50, วัสดุทลอง SKD11



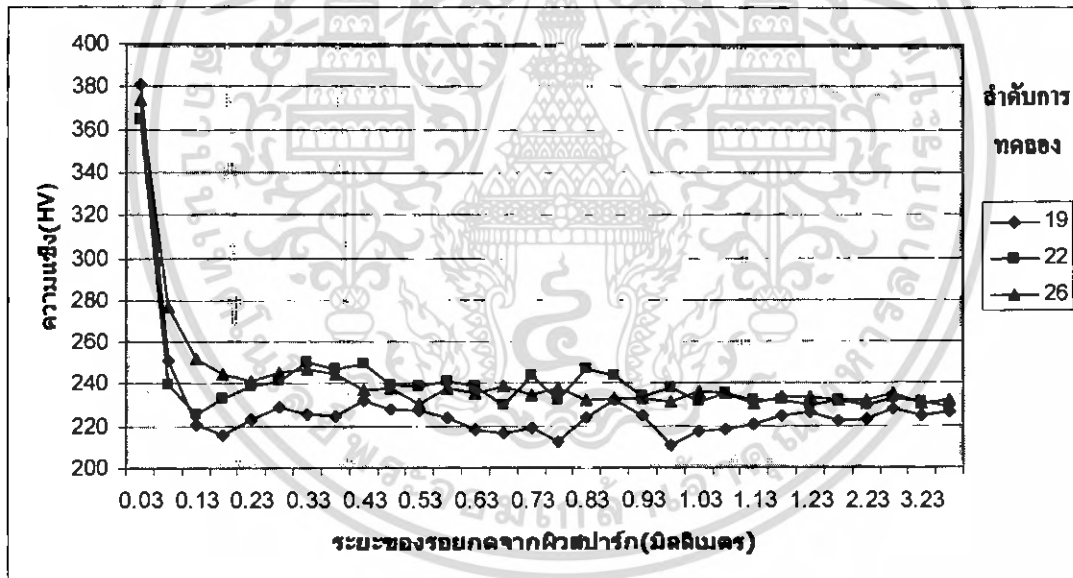
รูปที่ 4-16 ค่าความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 250, IP = 75, วัสดุทดลอง DC53



รูปที่ 4-17 ค่าความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 250, IP = 75, วัสดุทดลอง SKD11

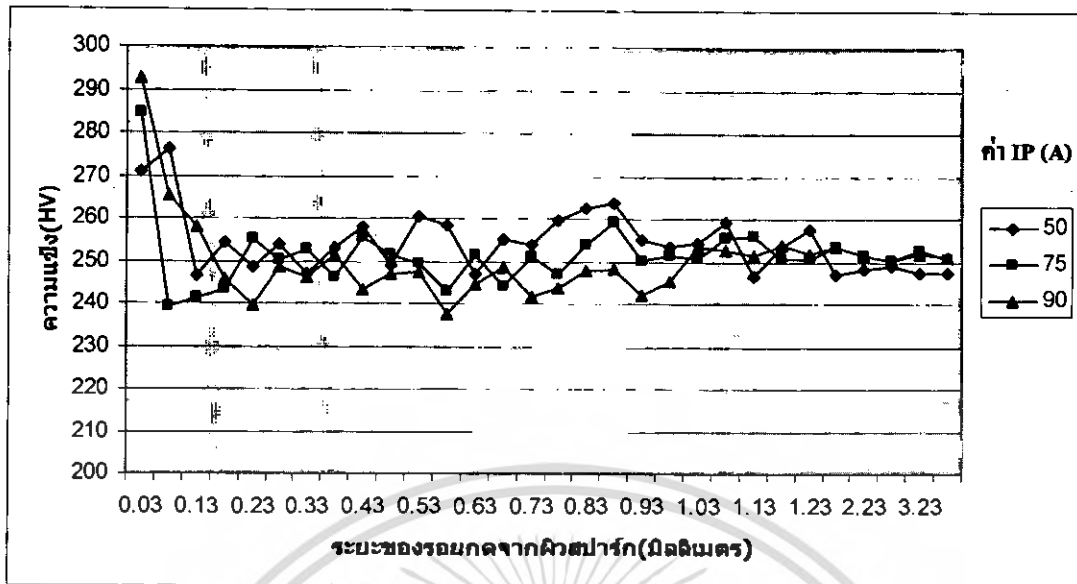


รูปที่ 4-18 ค่าความแรงและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 250, IP = 90, วัสดุทดลอง DC53

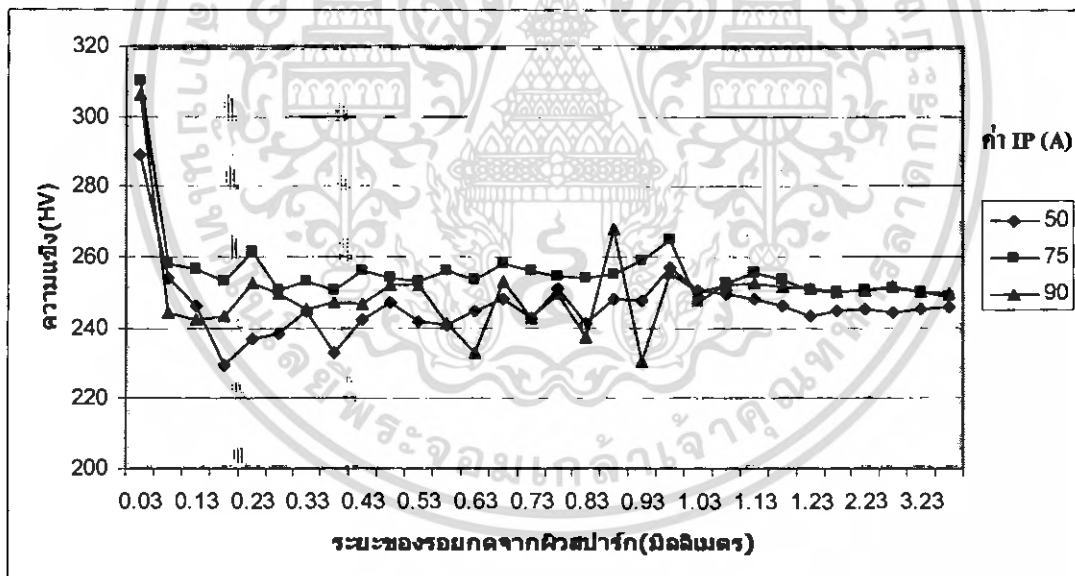


รูปที่ 4-19 ค่าความแรงและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 250, IP = 90, วัสดุทดลอง SKD11

สรุปผลเปรียบเทียบตัวแปรต่างๆจากรูปที่ 4-2 ถึง 4-19 พบว่า ค่า ON และค่า IP มีผลกระทบต่อค่าความแข็ง คือ ถ้าให้ค่า ON เพิ่มขึ้นจะส่งผลค่าความแข็งเพิ่มขึ้น และถ้าให้ค่า IP เพิ่มขึ้นจะส่งผลค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน และถ้าเปรียบระหว่างวัสดุทดลองทั้ง 2 ชนิด พบว่าที่พารามิเตอร์เหมือนกัน ค่าความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 มีค่าความแข็งมากกว่าเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11

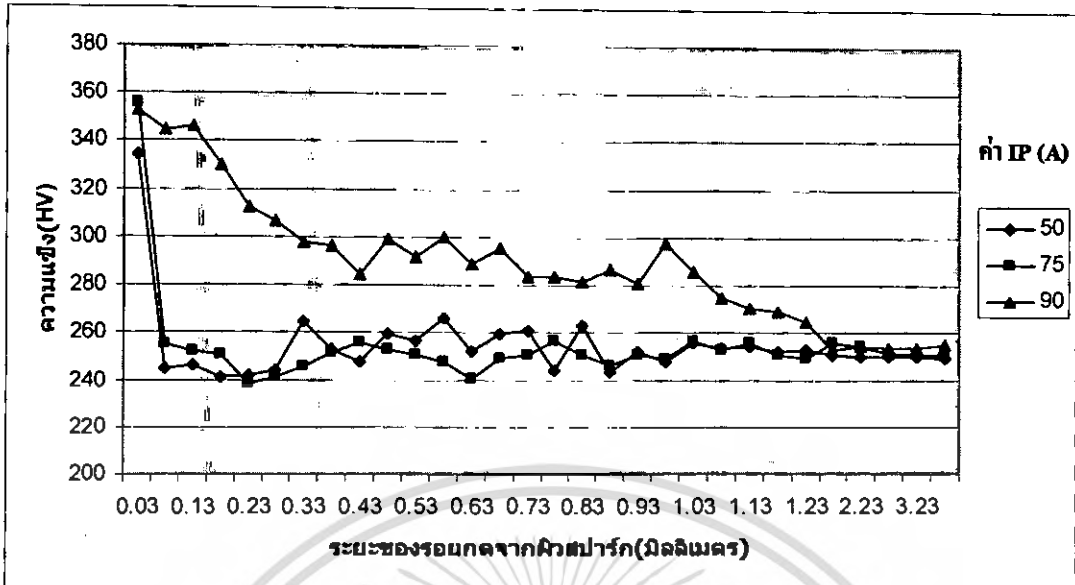


รูปที่ 4-20 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON คงที่เท่ากับ 125 โดยค่า IP แปรผันที่ 50, 75 และ 90, วัสดุทดลอง DC53

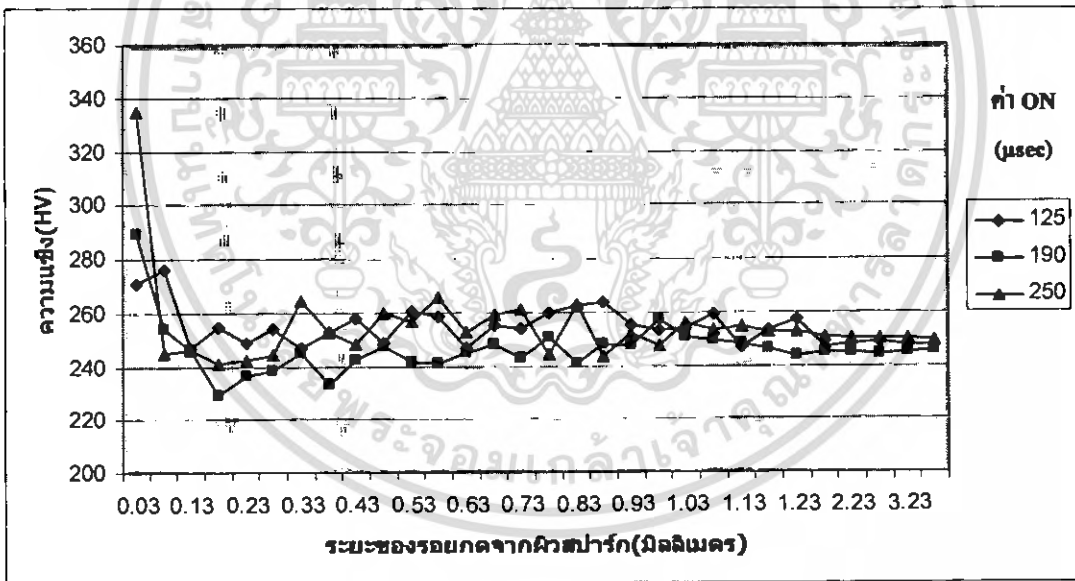


รูปที่ 4-21 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON คงที่เท่ากับ 190 โดยค่า IP แปรผันที่ 50, 75 และ 90, วัสดุทดลอง DC53

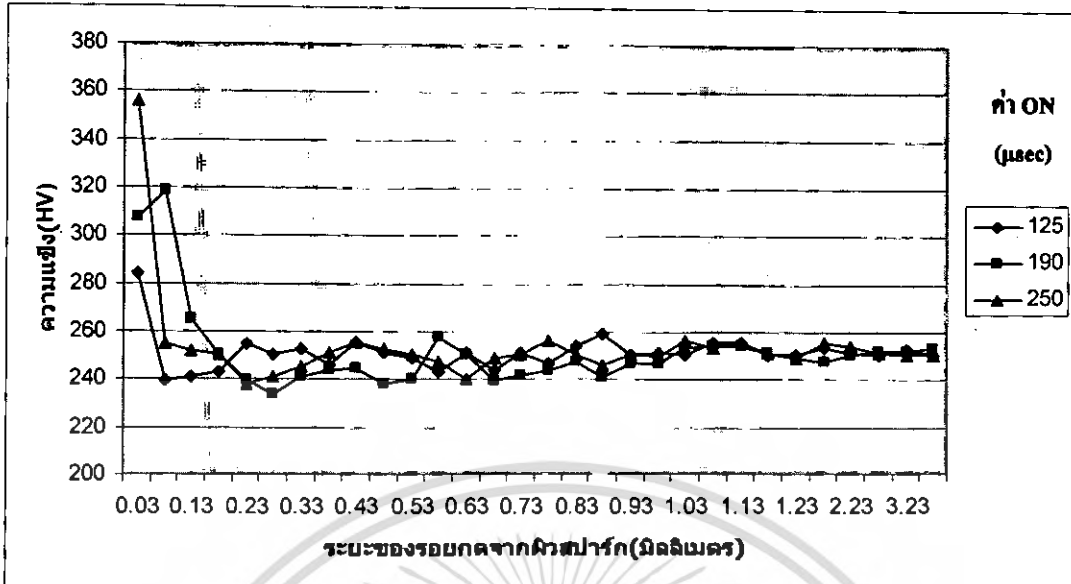
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



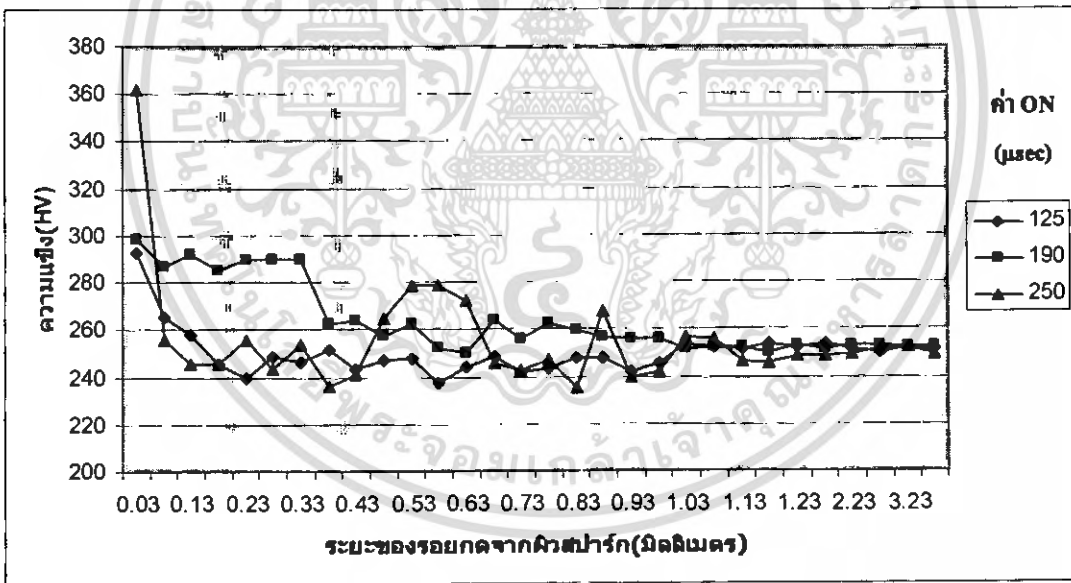
รูปที่ 4-22 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON คงที่เท่ากับ 250 โดยค่า IP แปรผันที่ 50, 75 และ 90, วัสดุทดลอง DC53



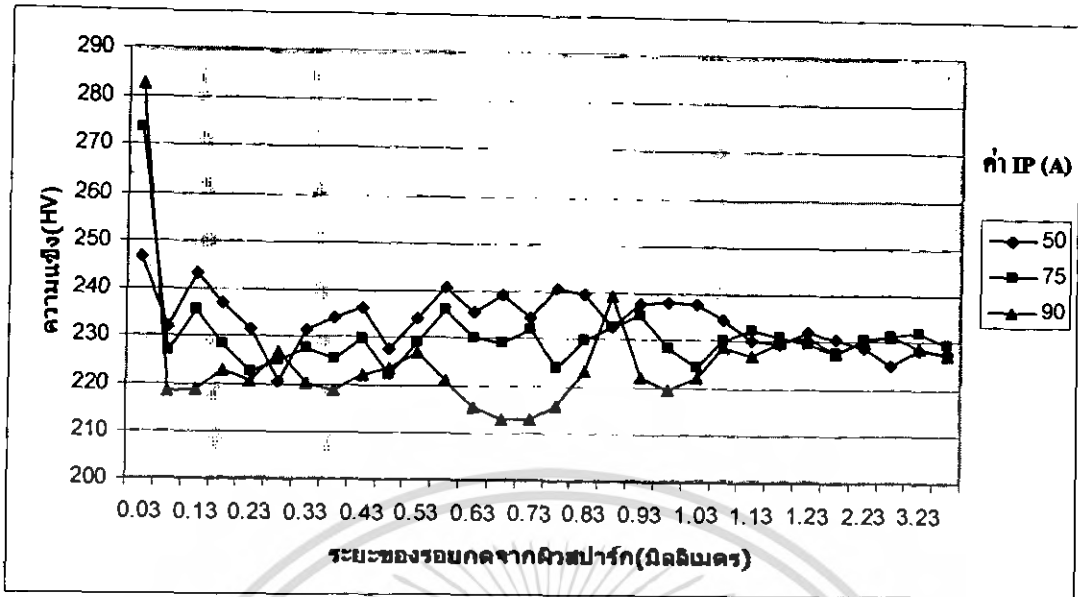
รูปที่ 4-23 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ IP คงที่เท่ากับ 50 โดยค่า ON แปรผันที่ 125, 190 และ 250, วัสดุทดลอง DC53



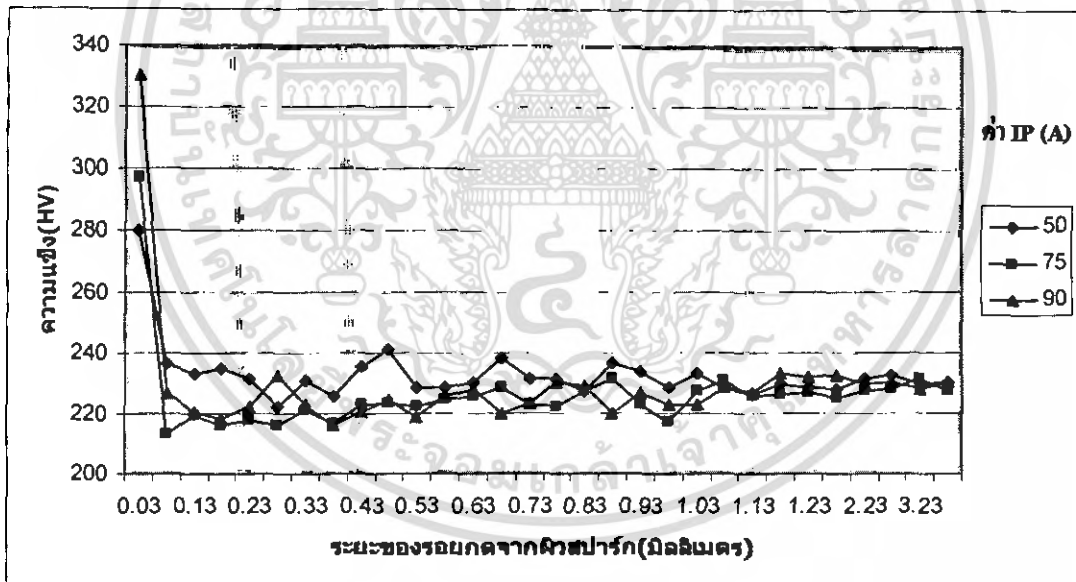
รูปที่ 4-24 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ IP คงที่เท่ากับ 75 โดยค่า ON แปรผันที่ 125, 190 และ 250, วัสดุทดลอง DC53



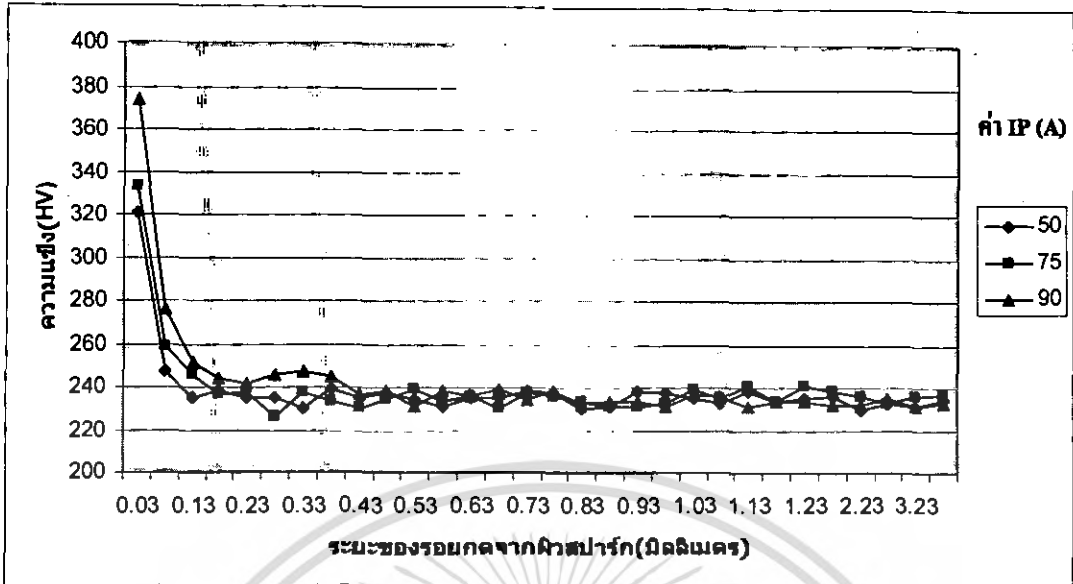
รูปที่ 4-25 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ IP คงที่เท่ากับ 90 โดยค่า ON แปรผันที่ 125, 190 และ 250, วัสดุทดลอง DC53



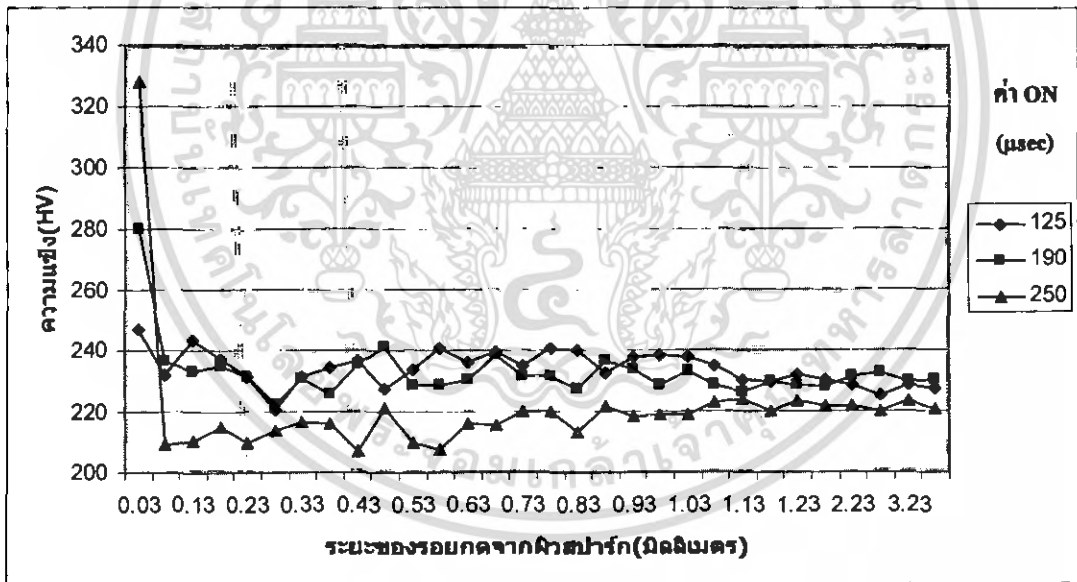
รูปที่ 4-26 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอกคจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON คงที่เท่ากับ 125 โดยค่า IP แปรผันที่ 50, 75 และ 90, วัสดุคอลลอยด์ SKD11



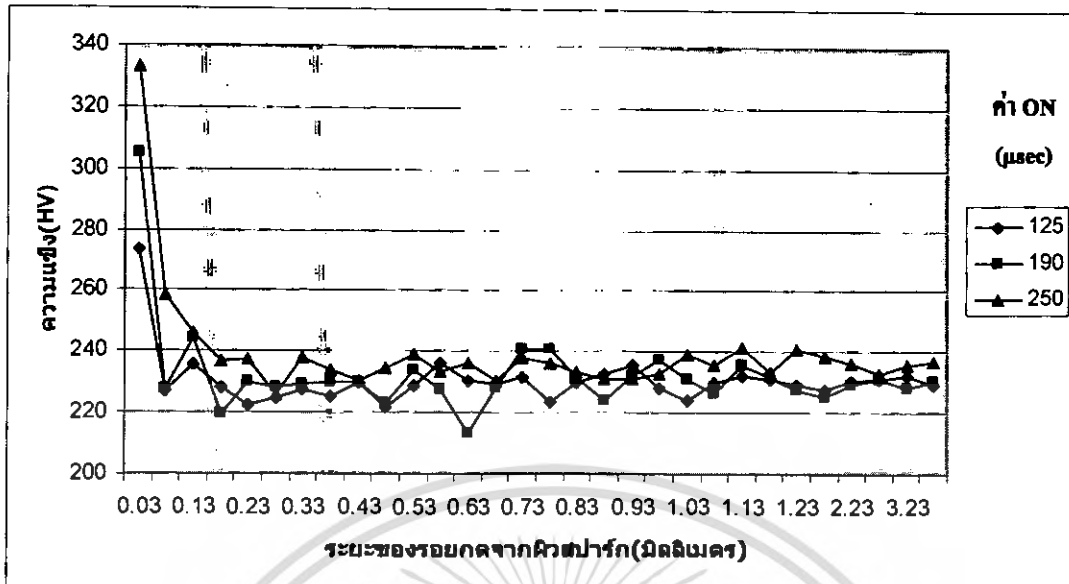
รูปที่ 4-27 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอกคจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON คงที่เท่ากับ 190 โดยค่า IP แปรผันที่ 50, 75 และ 90, วัสดุคอลลอยด์ SKD11



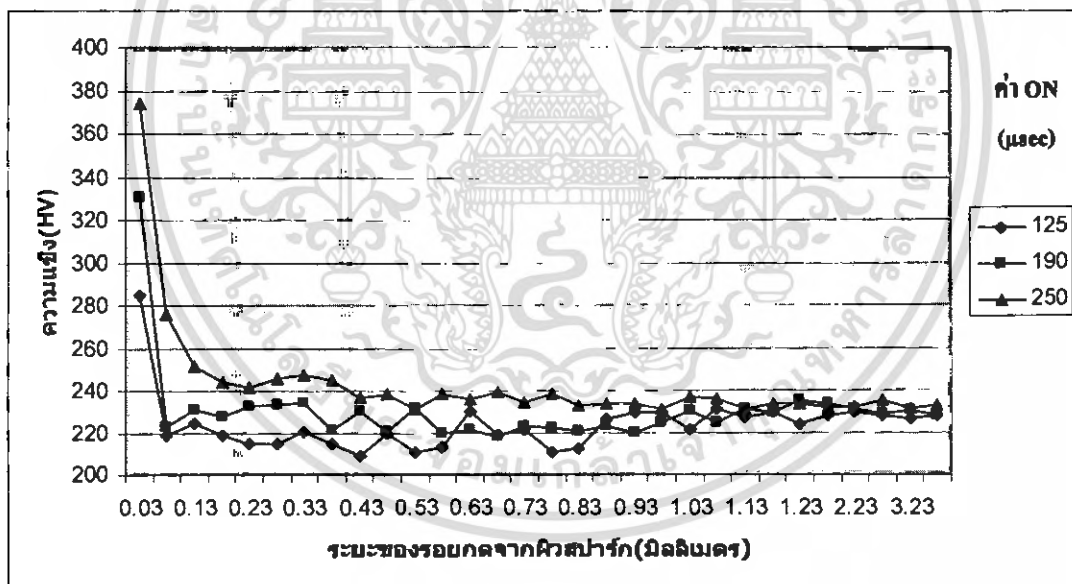
รูปที่ 4-28 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอกคจากฉนวนสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON คงที่เท่ากับ 250 โดยค่า IP แปรผันที่ 50, 75 และ 90, วัสดุคดลอง SKD11



รูปที่ 4-29 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอกคจากฉนวนสปาร์กที่พารามิเตอร์ IP คงที่เท่ากับ 50 โดยค่า ON แปรผันที่ 125, 190 และ 250, วัสดุคดลอง SKD11



รูปที่ 4-30 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอยบดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ IP คงที่เท่ากับ 75 โดยค่า ON แปรผันที่ 125, 190 และ 250, วิสตุททดลอง SKD11



รูปที่ 4-31 เปรียบเทียบค่าความแข็งและระยะรอยบดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ IP คงที่เท่ากับ 90 โดยค่า ON แปรผันที่ 125, 190 และ 250, วิสตุททดลอง SKD11

สรุปผลเปรียบเทียบตัวแปรต่างๆจากรูปที่ 4-20 ถึง 4-31 พบว่า ค่า ON และ ค่า IP มีผลกระทบต่อค่าความแข็งต่างกัน คือ ถ้าให้ค่า ON เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลค่าความแข็งเพิ่มขึ้นมาก และถ้าให้ค่า IP เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ผลกระทบที่มีต่อค่าความแข็ง ค่า ON จะส่งผลกระทบมากกว่าค่า IP

4.2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

จากตารางที่ 4-2 และ 4-3 แสดงผลการทดลองของค่าความแข็งในตำแหน่งต่างๆของวัสดุทดลอง เหล็กกล้าเครื่องมือทั้ง 2 ชนิด ซึ่งเป็นผลตอบสนองที่ต้องการ เพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อทดสอบว่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สนใจมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของวัสดุทดลองหรือไม่ และการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) โดยจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในทางสถิติเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือโปรแกรม STATGRAPHICS Plus และทดสอบสมมติฐานผลต่างระหว่างค่าความแข็งของวัสดุทดลองทั้ง 2 ชนิด เมื่อสุ่มตัวอย่างไม่เป็นอิสระต่อกัน (Pair t-test) โดยทดสอบแบบข้างเดียวด้านขวา เพื่อให้เห็นว่าค่าความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 มีค่ามากกว่าเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 หรือไม่ โดยจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในทางสถิติเข้ามาช่วยในการทดสอบสมมติฐาน โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือโปรแกรม STATGRAPHICS Plus เช่นกัน

4.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน คือการหาความผันแปรโดยรวมแล้วแยกออกเป็นความผันแปรเนื่องจาก ทรีทเมนต์ (Treatment) สำหรับแต่ละปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม และความผันแปรเนื่องจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุมแล้วพิจารณาความผันแปรเนื่องจากทรีทเมนต์ ว่ามีปริมาณมากหรือไม่เมื่อเทียบกับสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุมในระหว่างเงื่อนไขในการทดลองแล้วนำมาสร้างเป็นตาราง ANOVA จะเริ่มจากการพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติ (Signification) ของอิทธิพลร่วมที่ระดับสูงก่อน ซึ่งถ้าพบว่าอิทธิพลร่วมมีนัยสำคัญทางสถิติ หมายความว่า ถ้าเปลี่ยนระดับของปัจจัยตัวใด โดยให้ปัจจัยตัวอื่นคงที่แล้วจะส่งผลให้ตัวแปรตอบสนองเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งกล่าวไว้ว่า ปัจจัยหลักที่เกิดจากปัจจัยร่วมจะมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้วยนั่นเอง ดังนั้นเมื่ออิทธิพลร่วมมีนัยสำคัญทางสถิติแล้วก็ไม่จำเป็นต้องพิจารณาอิทธิพลหลักอีก เพราะแม้ว่าอิทธิพลหลักอยู่แล้ว ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติแต่แท้จริงแล้วมีอิทธิพลมาก

4.2.1.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองความแข็งของวัสดุทดลอง

เป็นการวิเคราะห์เพื่อดูว่าปัจจัยใดที่มีผลต่อการหาค่าตอบที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ โดยจะใช้โปรแกรม STATGRAPHICS Plus เป็นโปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์

จากสมมติฐาน

$$H_0 : \mu_i = \mu_j ; i \neq j$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อย 1 คู่ ; } i \neq j$$

กำหนดระดับนัยสำคัญไว้ที่ 0.05

ถ้าค่า P-value ในตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนมีค่ามากกว่า 0.05 จะยอมรับสมมติฐานหลักหรือ H_0 คือ ไม่มีความแตกต่างเชิงสถิติ

ถ้าค่า P-value ในตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนมีค่าน้อยกว่า 0.05 จะยอมรับสมมติฐานรองหรือ H_1 คือ อย่างน้อย 1 คู่ที่ทำให้มีความแตกต่างเชิงสถิติ

ตารางที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองความแข็งของวัสดุทดลองจากตาราง ANOVA

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F_0	P-Value
A	52391.4	2	26195.7	701.59	0.0000
B	8618.62	2	4309.31	115.42	0.0000
C	921.734	1	921.734	24.69	0.0000
AB	645.849	4	161.462	4.32	0.0059
AC	719.211	2	359.106	9.62	0.0005
BC	1685.4	2	842.698	22.57	0.0000
ABC	707.207	4	176.802	4.47	0.0036
Error	1344.15	36	37.3374		
Total		53			

โดยที่

- A คือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON)
- B คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP)
- C คือ ชนิดของวัสดุทดลอง
- AB คือ อิทธิพลร่วมระหว่างช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กับกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP)
- AC คือ อิทธิพลร่วมระหว่างช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กับชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือ
- BC คือ อิทธิพลร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) กับชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือ
- ABC คือ อิทธิพลร่วมของช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) และชนิดของเหล็กกล้า

ในการวิเคราะห์ทุกค่าผลตอบสนองจะกำหนดระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ตารางที่ 4-4 เป็นผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งของวัสดุทดลอง ในส่วนของอิทธิพลหลัก เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 คือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) และชนิดของวัสดุทดลอง (Material) และในส่วนของอิทธิพลร่วม (Interactions) เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 คือ ระหว่างช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กับกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) ระหว่างช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กับชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือ ระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) กับชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือ และอิทธิพลร่วมของช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) และชนิดของเหล็กกล้า แต่ตัวแปรใดที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งมากที่สุดหรือ น้อย ให้ดูที่ค่า F-Ratio พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งมากที่สุดคือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) คือ มีค่า F-Ratio เท่ากับ 701.59 ตัวแปรต่อมาคือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) มีค่า F-Ratio เท่ากับ

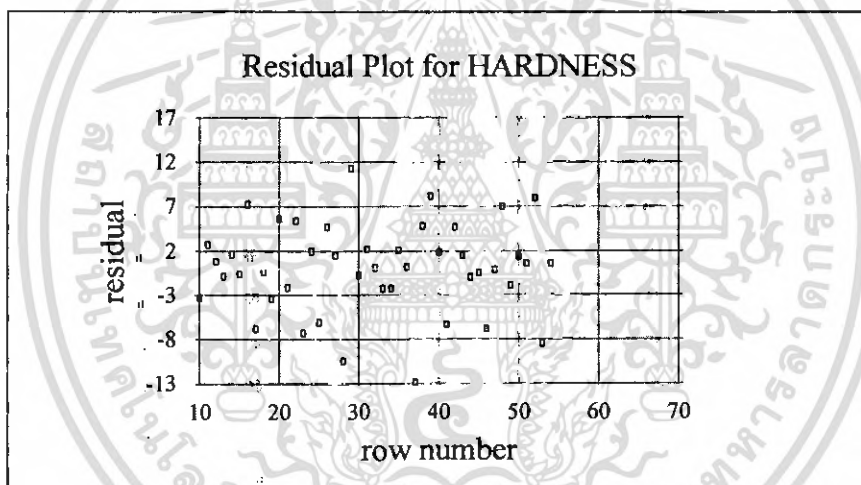
115.42 และตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งน้อยที่สุดคือ ชนิดของวัสดุทดลอง (Material) ซึ่งมีค่า F – Ratio เพียง 24.69 เท่านั้น จึงสรุปได้ว่าทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมเหล่านี้มีผลต่อความแข็งของวัสดุทดสอบ อย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$

4.2.1.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักทางสถิติหรือไม่ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ 3 ประเภท คือ

1. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้างโดยใช้ค่าส่วนตกค้างและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล มาทำการพล็อตกราฟค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน

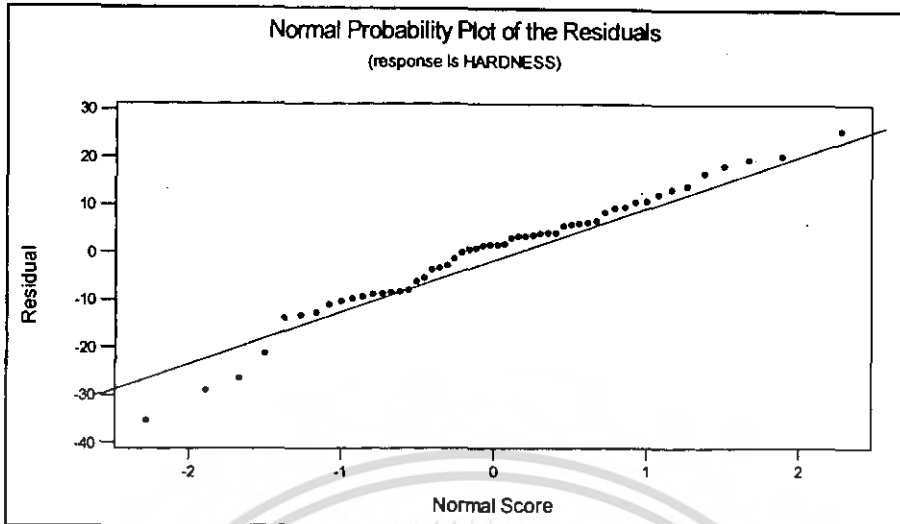


รูปที่ 4-32 ค่าส่วนตกค้างของค่าความแข็งของวัสดุทดลองกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล

จากรูปที่ 4-32 เป็นรูปที่แสดงค่าส่วนตกค้างของค่าความแข็งของวัสดุทดลองกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน

2. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบว่าเป็นการแจกแจงปกติ

โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) พล็อตลงบนกราฟทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Paper: NOPP) หากลักษณะของกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเกือบจะตรงแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

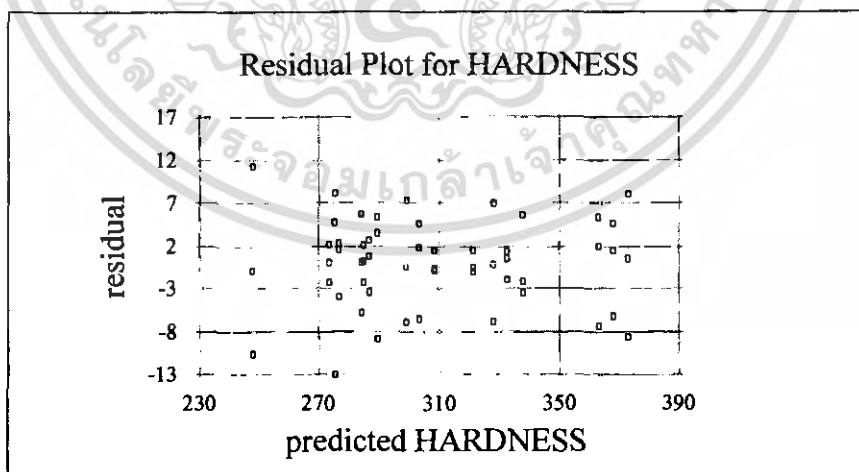


รูปที่ 4-33 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าความแข็งของวัสดุทดลอง

จากรูปที่ 4-33 เป็นกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) สำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าความแข็งของวัสดุทดลอง พบว่าได้ว่าค่าส่วนตกค้างเกาะกลุ่มกันไปในลักษณะเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบปกติ นั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์สามารถเชื่อถือได้

3. การตรวจสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูล

โดยพล็อตค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted Values) การตรวจสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูล หากแบบจำลองถูกต้องแล้วจากกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ได้จากการทำนายไม่ควรแสดงรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ

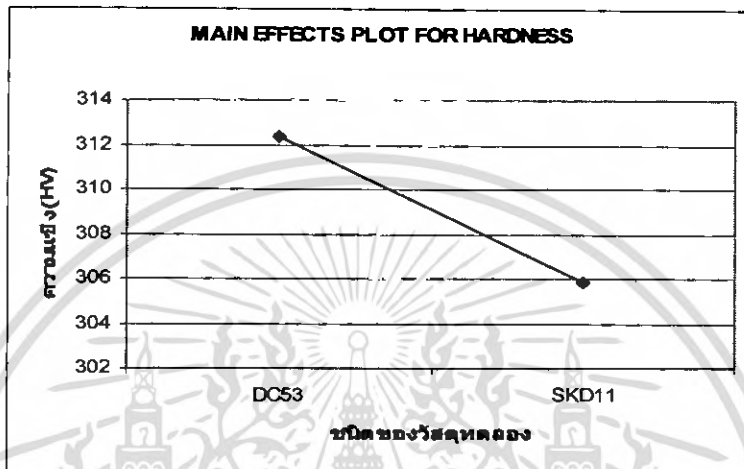


รูปที่ 4-34 ค่าส่วนตกค้างกับค่าการทำนายค่าความแข็งของวัสดุทดลอง

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งของชิ้นงานทดลอง จากรูป 4-34 กราฟได้ไม่แสดงรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ แสดงให้เห็นถึงข้อมูลมีความสม่ำเสมอหรือข้อมูลที่ได้นี้มีความเสถียรภาพ

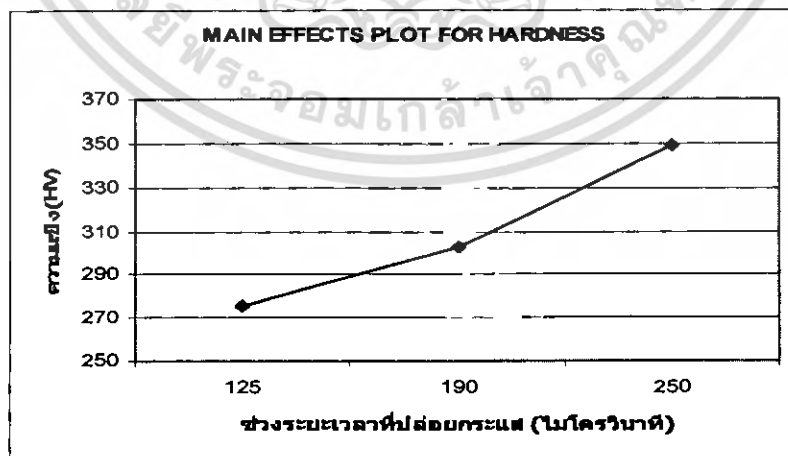
4.2.1.3 การเปรียบเทียบระดับปัจจัย

ในระดับปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานทดลอง จะแสดงดังรูปต่อไปนี้



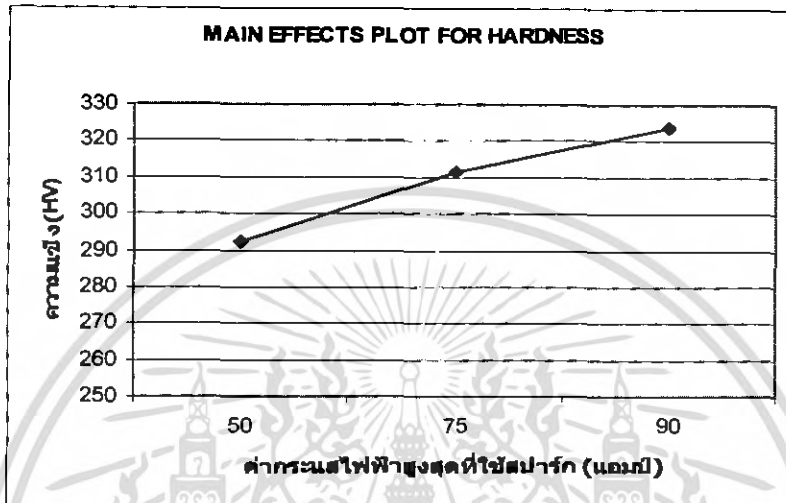
รูปที่ 4-35 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานทดลอง เปรียบระหว่างวัสดุทดลอง เหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 และ SKD11

จากรูปที่ 4-35 เป็นการเปรียบเทียบระดับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานทดลอง โดยเปรียบเทียบระหว่าง เหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 กับ SKD11 พบว่าระดับปัจจัยชิ้นงานทดลองเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 ส่งผลให้ค่าความแข็งที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานทดลองมากกว่าระดับปัจจัยชิ้นงานทดลองเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11



รูปที่ 4-36 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานทดลอง โดยค่า ON แปรผันที่ 125, 190 และ 250 μsec

จากรูปที่ 4-36 เป็นการเปรียบเทียบระดับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานทดลอง โดยปัจจัยที่เปรียบเทียบคือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแส (ON) 3 ระดับ คือ 125, 190 และ 250 μsec โดยให้ปัจจัยตัวอื่นคงที่ พบว่าระดับปัจจัยช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแส (ON) ที่ส่งผลให้ค่าความแข็งที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานทดลองมากที่สุดคือ 250 μsec และอันดับต่อมาคือ 190, 125 μsec ตามลำดับ

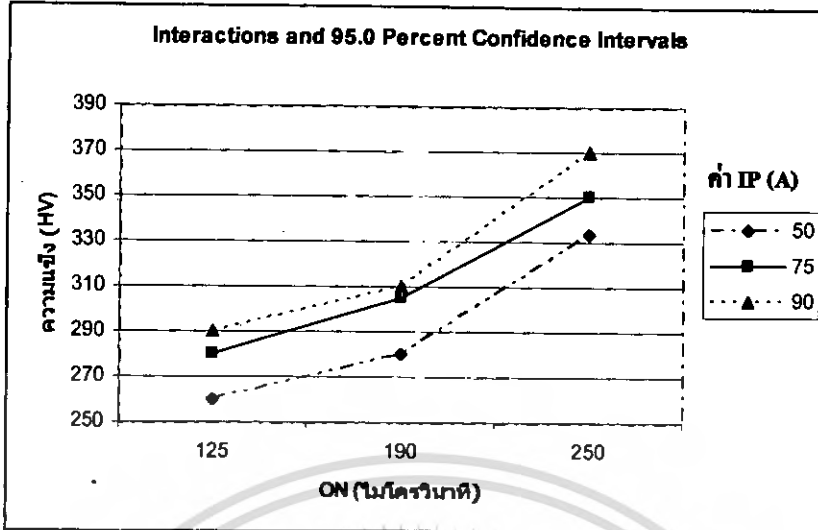


รูปที่ 4-37 ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานทดลอง โดยค่า IP แปรผันที่ 50, 75 และ 90 A

จากรูปที่ 4-37 เป็นการเปรียบเทียบระดับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานทดลอง โดยปัจจัยที่เปรียบเทียบคือ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) 3 ระดับ คือ 50, 75 และ 90 แอมป์ โดยให้ปัจจัยตัวอื่นคงที่ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) ที่ส่งผลให้ค่าความแข็งที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานทดลองมากที่สุดคือ 90 แอมป์ และอันดับต่อมาคือ 75, 50 แอมป์ ตามลำดับ

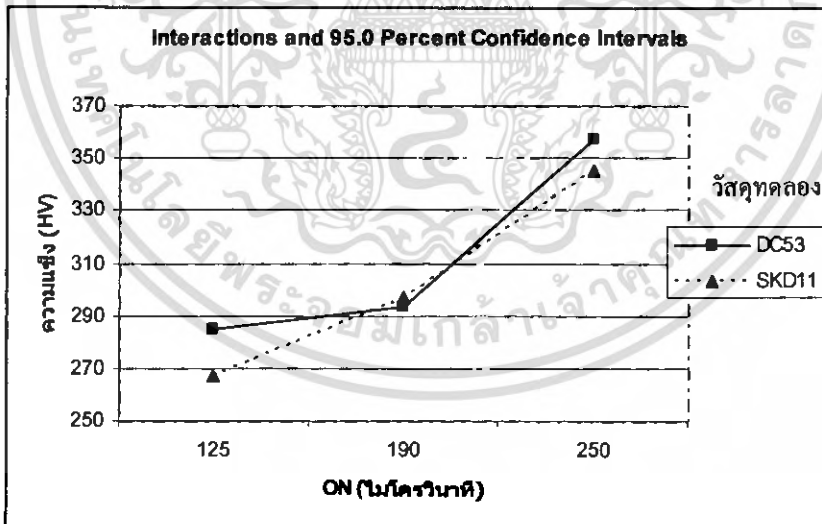
4.2.1.4 การมีปฏิริยาต่อกัน (Interaction)

การมีปฏิริยาต่อกัน (Interaction) ของค่าความแข็งของชิ้นงานทดลอง ระหว่างตัวแปรต่างๆ จะแสดงดังรูปต่อไปนี้



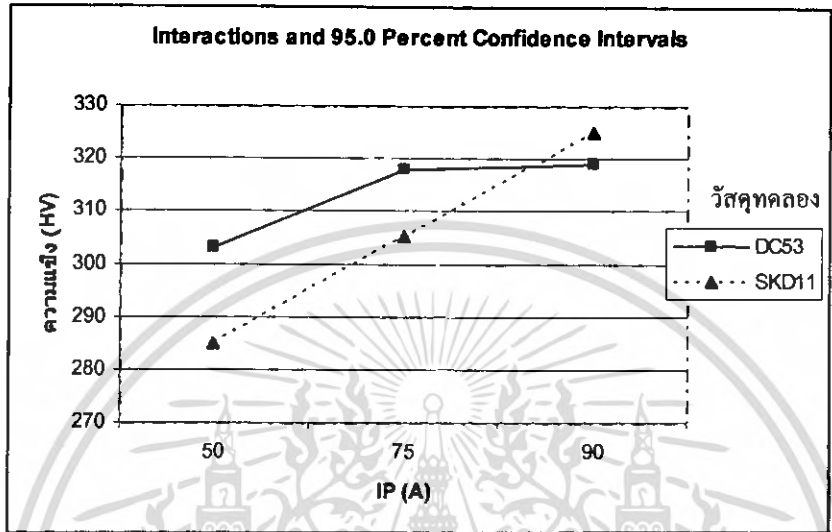
รูปที่ 4-38 การมีปฏิริยาต่อกัน (Interaction) ของค่าความแรงของชิ้นงานทดลอง ระหว่างตัวแปร ON กับ IP

จาก รูปที่ 4-38 พบว่าช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแส (ON) และค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) มีอิทธิพลต่อค่าความแรงของชิ้นงาน และในส่วนการมีปฏิริยาต่อกัน (Interaction) ของช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแส (ON) และค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) จากกราฟพบว่าตัวแปรทั้งสองชนิดเมื่อมีการกระทำร่วมกันแล้วจะส่งผลต่อค่าความแรงของวัสดุทดลอง



รูปที่ 4-39 การมีปฏิริยาต่อกัน (Interaction) ของค่าความแรงของชิ้นงานทดลอง ระหว่างตัวแปร ON กับ ชนิดของวัสดุทดลอง

จาก รูปที่ 4-39 พบว่าช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแส (ON) และชนิดของวัสดุทดลอง มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของชิ้นงาน และในส่วนของปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแส (ON) และชนิดของวัสดุทดลองจากกราฟพบว่าตัวแปรทั้งสองชนิดเมื่อมีการกระทำร่วมกันแล้ว จะส่งผลต่อค่าความแข็งของวัสดุทดลอง



รูปที่ 4-40 การมีปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของค่าความแข็งของชิ้นงานทดลอง ระหว่างตัวแปร IP กับ ชนิดของวัสดุทดลอง

จาก รูปที่ 4-40 พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) และชนิดของวัสดุทดลอง มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของชิ้นงาน และในส่วนของปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) และชนิดของวัสดุทดลองจากกราฟพบว่าตัวแปรทั้งสองชนิดเมื่อมีการกระทำร่วมกันแล้วจะส่งผลต่อค่าความแข็งของวัสดุทดลอง

4.2.2 การทดสอบสมมติฐานผลต่างระหว่างค่าความแข็งของวัสดุทดลองทั้ง 2 ชนิด (Pair t-test)

เมื่อตัวอย่างไม่เป็นอิสระต่อกัน จึงต้องใช้วิธีการทดสอบสมมติฐานผลต่างระหว่างค่าความแข็งของวัสดุทดลองทั้ง 2 ชนิด แบบ (Pair t-test) ถึงจะเหมาะสม โดยทดสอบแบบข้างเดียวด้านขวา เพื่อให้เห็นว่าค่าความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 มีค่ามากกว่าเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 หรือไม่

จากสมมติฐาน

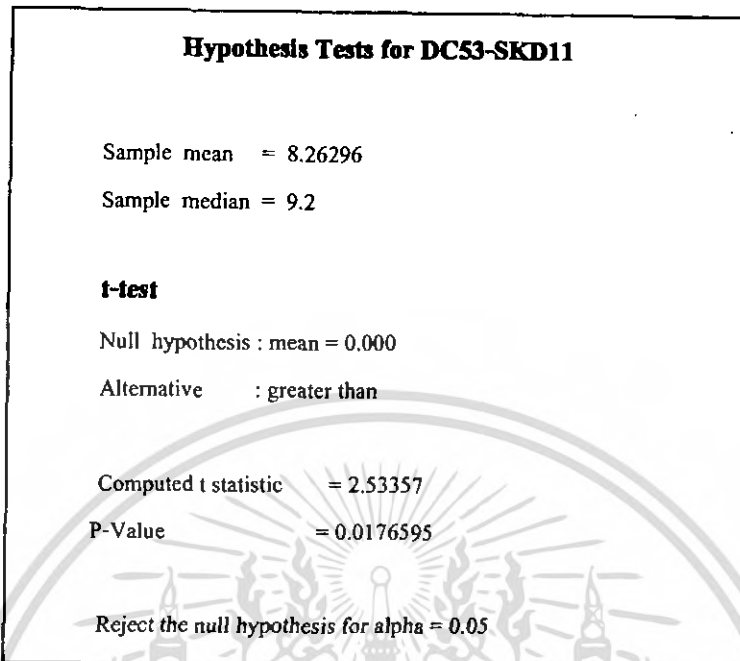
$$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_1 : \mu_1 - \mu_2 > 0$$

กำหนดระดับนัยสำคัญไว้ที่ 0.05

ถ้าค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 จะยอมรับสมมติฐานหลักหรือ H_0 คือไม่มีความแตกต่างเชิงสถิติ

ถ้าค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 จะยอมรับสมมติฐานรองหรือ H₁, คือ มีความแตกต่างเชิงสถิติ



รูปที่ 4-41 Output การทดสอบสมมติฐานแบบ (Pair t-test) จากโปรแกรม STATGRAPHICS Plus

จาก รูปที่ 4-41 ในการทดสอบสมมติฐานแบบ (Pair t-test) ที่กำหนดระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ จาก Output ที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานแบบ (Pair t-test) ในโปรแกรม STATGRAPHICS Plus พบว่าค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.0176595 ดังนั้นจึงปฏิเสธสมมติฐานหลักสรุปได้ว่าค่าความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 มีค่ามากกว่าเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 จริง ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

สำหรับการวิจัยและการทดลองในครั้งนี้เป็นการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อความแข็งของวัสดุทดลองเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 และ SKD11 ที่ทำการตัดขึ้นรูปด้วยอีดีเอ็ม (Electrical Discharge Machining) เพื่อทำการศึกษาลักษณะต่อความแข็งขณะที่ทำการเปลี่ยนระดับตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลอง เพื่อนำผลที่ได้ไปปรับใช้กับการขึ้นรูปแม่พิมพ์โดยกรรมวิธีการอีดีเอ็ม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากการขึ้นรูปโดยกรรมวิธีการอีดีเอ็ม จะทำให้เกิดความร้อนสูง ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนความแข็งของวัสดุ และแม่พิมพ์ที่นำไปใช้งานอุตสาหกรรมต้องการความแม่นยำและความเที่ยงตรงสูงมักใช้การขึ้นรูปโดยกรรมวิธีการอีดีเอ็ม ซึ่งกรรมวิธีการอีดีเอ็ม อาจส่งผลกระทบต่อทำให้วัสดุที่ทำแม่พิมพ์มีประสิทธิภาพการใช้งานลดน้อยลงจากความแข็งที่เกิดการเปลี่ยนแปลง ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของ “การศึกษานิทธิพลของตัวแปรในการตัดที่มีผลกระทบต่อความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53 และ SKD 11 ที่ผ่านกรรมวิธีอีดีเอ็ม”

จากการทดลองได้กำหนดตัวแปรต่างๆดังนี้ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) มี 3 ระดับคือ 125 190 และ 250 μsec ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) มี 3 ระดับคือ 50 75 และ 90 แอมแปร์ วัสดุทดลอง 2 ชนิดคือ เหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53 และ SKD 11 ส่วนอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองคือ ทองแดง ในการทดลองนี้ในแต่ละเงื่อนไขการตัดได้ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รวมทั้งสิ้น 54 ครั้ง การทดลองได้นำผลการทดสอบความแข็งมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะของรอยกดทดสอบในแต่ละระดับตัวแปรต่างๆ โดยวิเคราะห์ผลโดยการเปรียบเทียบกราฟ และใช้หลักการทางสถิติมาทดสอบสมมติฐานต่างๆ และตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลอง

5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ผลจากกราฟจะเห็นได้ว่า ตัวแปรที่เลือกมาทำการทดลองทุกตัวมีผลกระทบต่อความแข็งของชิ้นงานเปลี่ยนไป จากการศึกษารายละเอียดผลการทดลองพบว่า ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) มีผลกระทบต่อความแข็งที่ผิวสปาร์กเกิดความแข็งขึ้นจากการให้พลังงานแก่ชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานเกิดการสะสมพลังงาน เมื่อพลังงานถูกถ่ายเทออกไปอย่างรวดเร็วก็จะทำให้ผิวชิ้นงานเกิดความแข็งขึ้นได้เหมือนกรรมวิธีการชุบแข็ง ส่วนค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) ก็มีผลกระทบต่อความแข็งเช่นกัน เนื่องจากถ้าพลังงานยิ่งมากจะทำให้ผิวชิ้นงานเกิดการดูดซับพลังงานมากไปด้วย แล้วเมื่อหยุดการสปาร์กพลังงานก็จะเกิดการถ่ายเทพลังงานออกไปอย่างรวดเร็วจึงทำให้ผิวชิ้นงานแข็งขึ้นเหมือนการชุบแข็งเช่นกัน แต่ถ้าเปรียบเทียบระหว่าง ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กับค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) แล้วพบว่าช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) จะส่งผลกระทบต่อความแข็งของวัสดุทดลองมากกว่าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) ส่วนทางด้านของวัสดุทดลองก็มีผลกระทบในด้านของความแข็งของชิ้นงานทดลองเช่นกันคือ จากผลการทดลองจะพบว่า

วัสดุทดลองเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 จะมีค่าความแข็งมากกว่าวัสดุทดลองที่เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ดังนั้นกรรมวิธีอิตีเอ็มทำให้ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเนื่องจากความร้อนจากกรรมวิธีอิตีเอ็ม ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกระบายอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในลักษณะของการชุบแข็ง อีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ค่าความแข็งที่ผิวชิ้นงานเพิ่มขึ้นคือ การสปาร์กทำให้เกิดการแตกตัวของคาร์บอนในสารไดอิเล็กทริกแทรกเข้าไปในผิวงานก็จะส่งผลทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นเช่นกัน

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยจะวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อทดสอบว่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สนใจมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของวัสดุทดลองหรือไม่ และการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) โดยจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในทางสถิติเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือโปรแกรม STATGRAPHICS Plus และทดสอบสมมติฐานผลต่างระหว่างค่าความแข็งของวัสดุทดลองทั้ง 2 ชนิด เมื่อสุ่มตัวอย่างไม่เป็นอิสระต่อกัน (Pair t-test) โดยทดสอบแบบข้างเดียวด้านขวา เพื่อให้เห็นว่าค่าความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 มีค่ามากกว่าเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 หรือไม่ โดยจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในทางสถิติเข้ามาช่วยในการทดสอบสมมติฐาน โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือโปรแกรม STATGRAPHICS Plus เช่นกัน ผลทางสถิติที่ได้จากโปรแกรม STATGRAPHICS Plus มีดังนี้

1. ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) และชนิดของวัสดุทดลอง มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของวัสดุทดลอง อย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$
2. มีการกระทำร่วมระหว่าง ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กับ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP), ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กับ ชนิดของวัสดุทดลอง, กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) กับ ชนิดของวัสดุทดลอง และการกระทำร่วมกันทั้ง 3 ปัจจัย คือ ช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON) กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก (IP) และชนิดของวัสดุทดลอง อย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$
3. ค่าความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 มีค่ามากกว่าเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 อย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$

5.2 ข้อเสนอดำหรับงานวิจัยอิตีเอ็ม

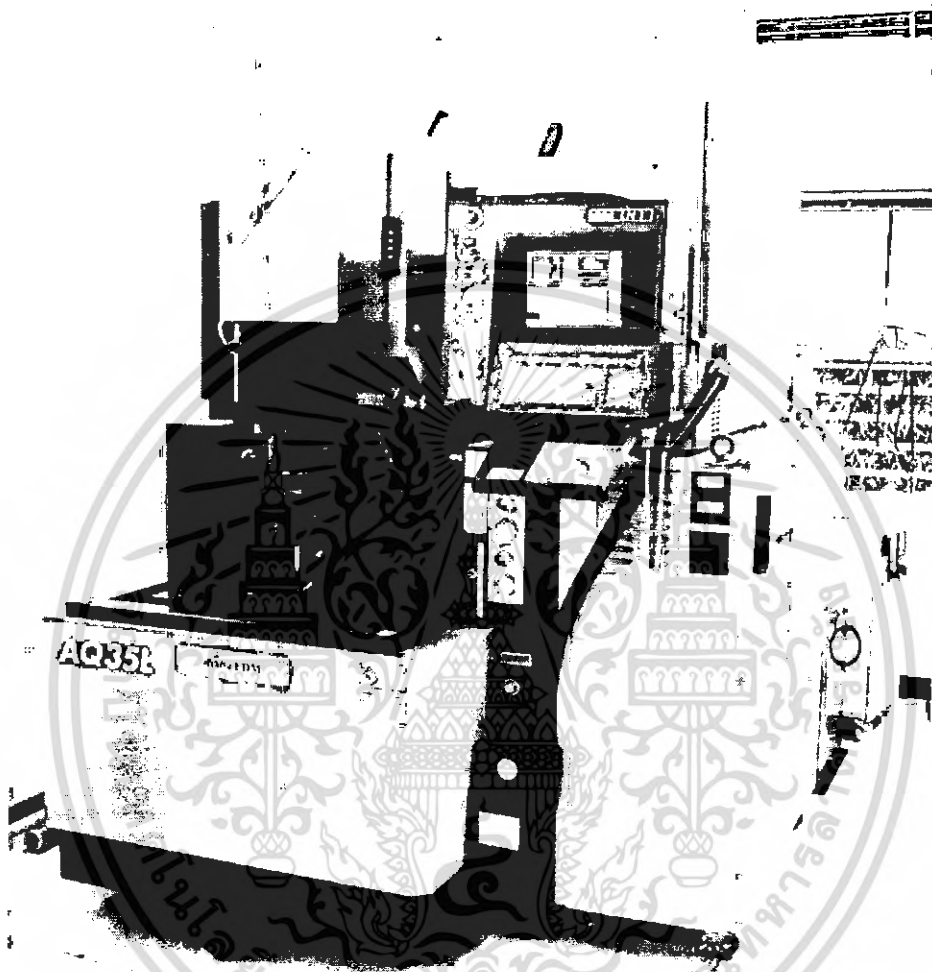
ควรตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุเพื่อความสัมพันธ์กับความแข็งของวัสดุที่เปลี่ยนไป รวมทั้งการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี ซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงของความแข็งขึ้น

หนังสืออ้างอิง

- ชาญวดี คังจิตวิทยา และ สาโรช จิตภิธรดิพงษ์, 2533. วัสดุในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : หจก.เอส-เอน การพิมพ์
- จักรินทร์ จงสวัสดิ์, โชคชัย ยาหะ และ สาคร สุบิน, 2543. อิทธิของการแปรค่าพารามิเตอร์ต่อคุณสมบัติของงานด้วยกระบวนการกัดเจาะด้วยไฟฟ้า. ปรินญาณินท์ สาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 4 – 57.
- ปัญญารัตน์ วงษ์ราษฎร์, กฤษณา เหล่าจันทร์ และ กากร ดวงมณี, 2545. ผลของการแปรค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการกัดเจาะด้วย EDM ต่อสมบัติงาน. ปรินญาณินท์ สาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 1 – 27.
- พร้อมสิน บินยง, วีระชัย บอระเฮม และ ศัญญา สุขพัฒนากุล, 2548. การศึกษาอิทธิพลตัวแปรในการตัดที่มีผลกระทบต่อความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53. ปรินญาณินท์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 1 – 86.
- แม้น อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา, วัสดุวิศวกรรม, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ห้อป.
- Hassan El-Hofy, 2005. Advanced Machining Processes : Nontraditional and Hybrid Machining Processes. NewYork : McGraw-Hill Professional, pp. 115-129.
- Metals Park, 1989. Metal Handbook. Volume 16, machining ,American Society for Metals, OH : ASM International, pp. 557-564.



วิธีการใช้เครื่องอีดีเอ็ม



รูปที่ ผก 1 ภาพเครื่องอีดีเอ็มยี่ห้อ Sodick รุ่น AQ35L

วิธีการใช้เครื่องสามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

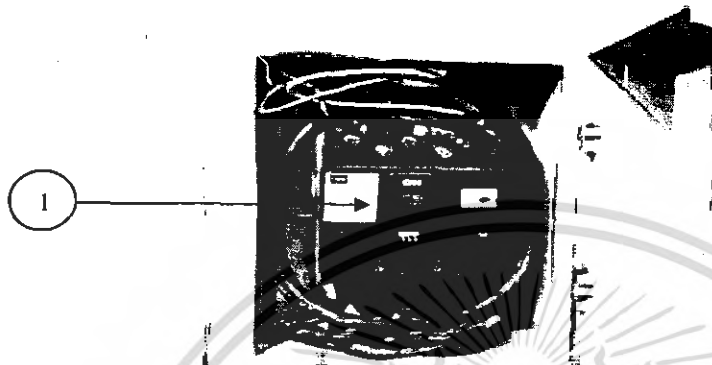
1. การเปิดเครื่อง
2. การติดตั้งอิเล็กโทรดและชิ้นงาน
3. การเซ็ตอัพเครื่อง การป้อนโค้ดต่าง ๆ และการเริ่มทำการ สปราร์ค
4. การถอดอิเล็กโทรดและชิ้นงาน
5. การปิดเครื่อง

ผก 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

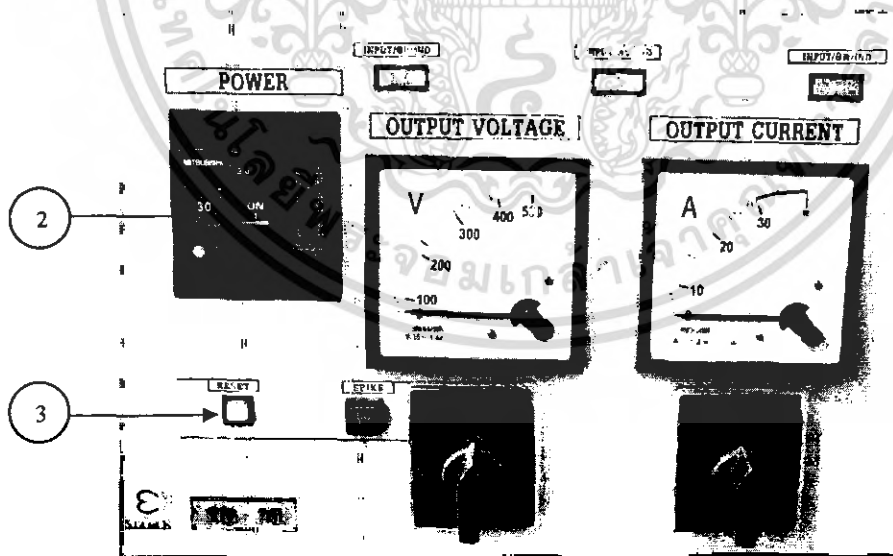
1. การเปิดเครื่อง

1.1 เปิดสวิตช์เบรกเกอร์ (Breaker) หมายเลข 1 ดังรูปที่ ผศ 1



รูปที่ ผศ 2 สวิตช์เบรกเกอร์ (Breaker)

1.2 เปิดสวิตช์เครื่องแปลงไฟฟ้า หมายเลข 2 จากปุ่มกดปุ่ม RESET หมายเลข 3 ดังรูปที่ ผศ 3

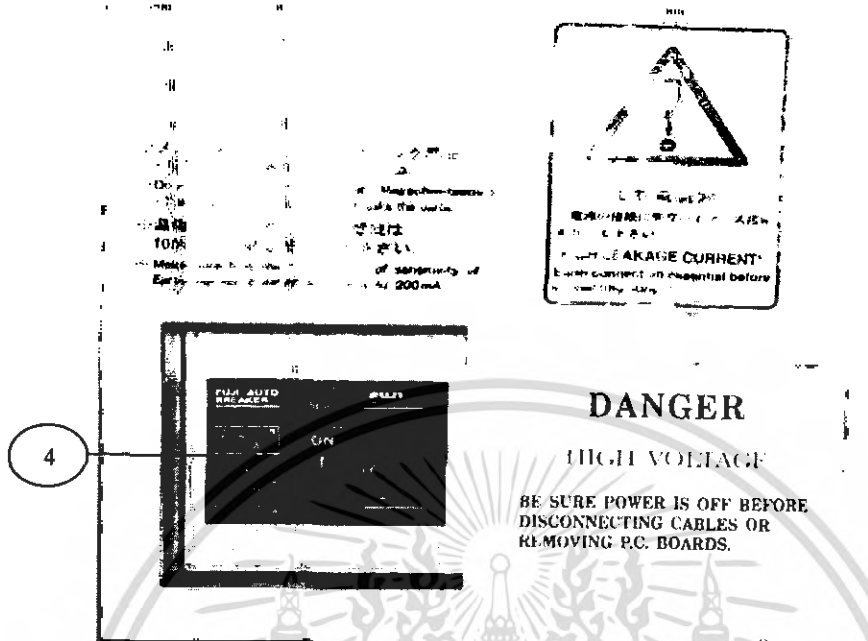


รูปที่ ผศ 3 เครื่องแปลงไฟฟ้า

ผศ 3

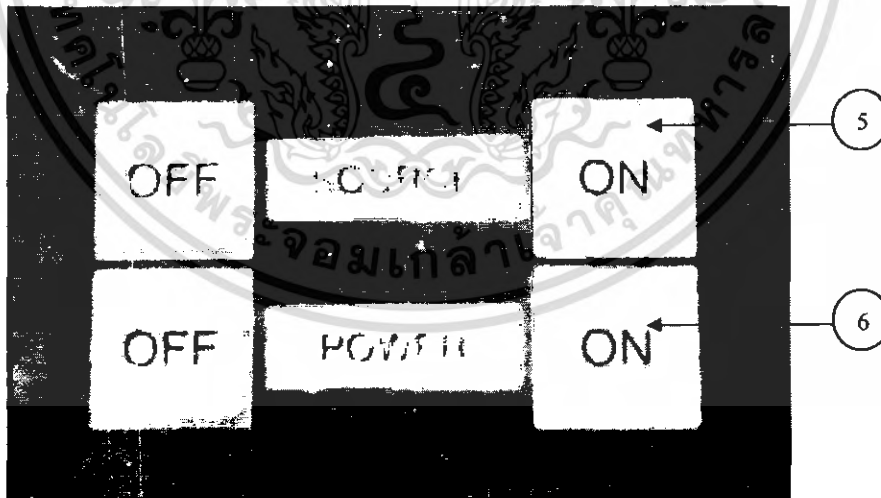
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 เปิดสวิตช์เบรกเกอร์ (Breaker) ด้านหลังเครื่องอีดีเอ็ม หมายเลข 4 ดังรูปที่ ผก 4



รูปที่ ผก 4 สวิตช์เบรกเกอร์ (Breaker) ด้านหลังเครื่องอีดีเอ็ม

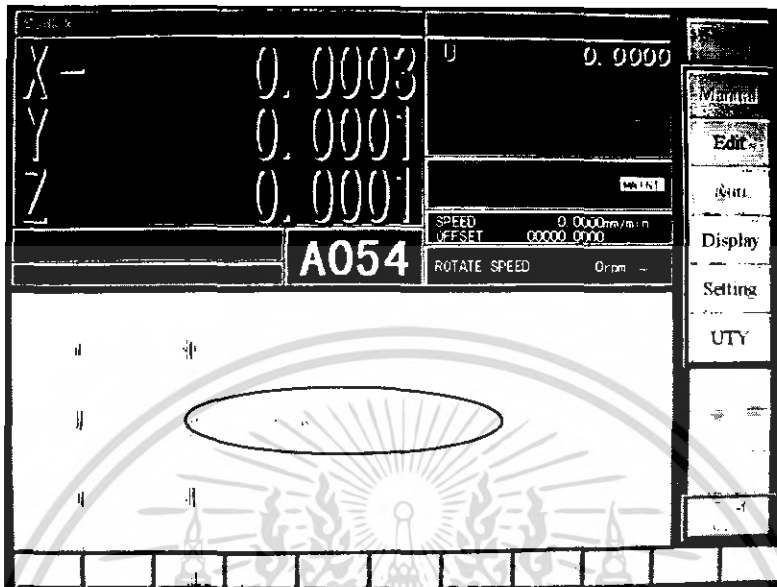
1.4 กดปุ่ม SOURCE ON (สีขาว) หมายเลข 5 เพื่อทบทวนปฏิบัติการของเครื่องอีดีเอ็ม เวลาที่ใช้ในการบูทประมาณ 3 นาที ดังรูปที่ ผก 5



รูปที่ ผก 5 ปุ่ม เปิด/ปิด ระบบเครื่องอีดีเอ็ม

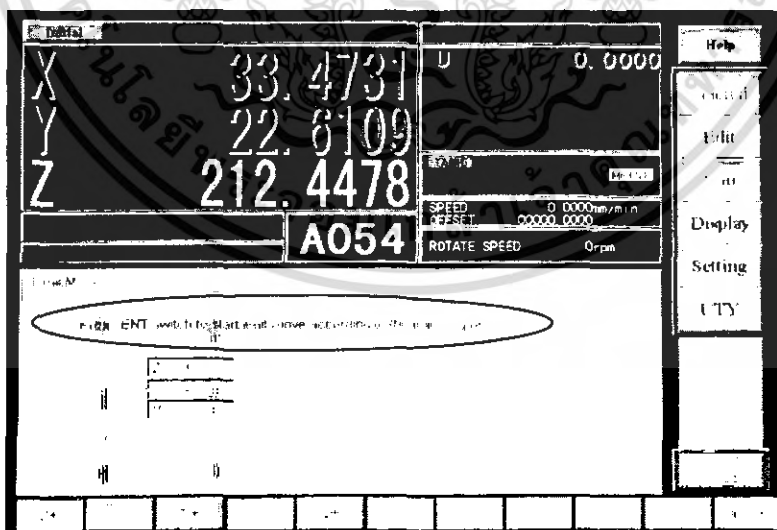
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 จากนั้นจะปรากฏข้อความแสดงที่หน้าจอ Please press POWER ON switch ให้ทำการกดปุ่ม POWER ON (สีเขียว) หมายเลข 6 ดังรูปที่ ผก 5 เพื่อเปิดในส่วนของแมคคาณิก

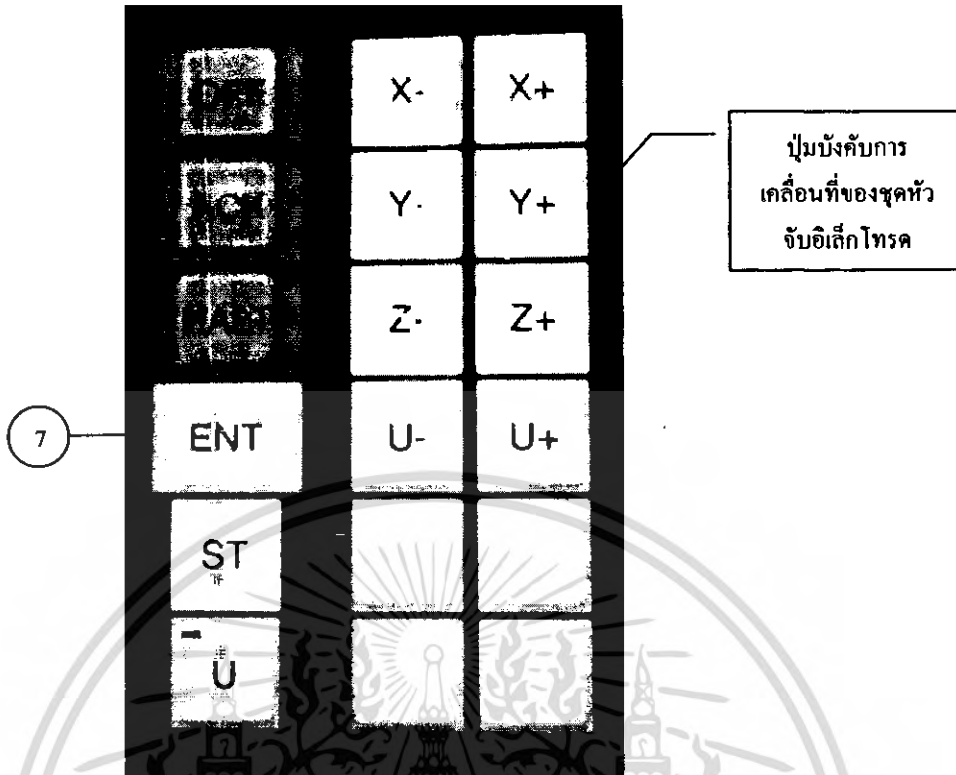


รูปที่ ผก 6 หน้าจอแสดงคำสั่งให้กดปุ่ม POWER ON หลังจากบูทระบบเสร็จแล้ว

1.6 เมื่อกดปุ่ม POWER ON หน้าจอจะปรากฏข้อความ Press ENT switch to start limit move according to the following order ดังรูปที่ ผก 7 เป็นคำสั่งให้กดปุ่ม ENT หมายเลข 7 ดังรูป ผก 8 เพื่อให้ส่วนของแมคคาณิกเคลื่อนหา ลิมิตสวิทช์ในทิศทางของเครื่อง

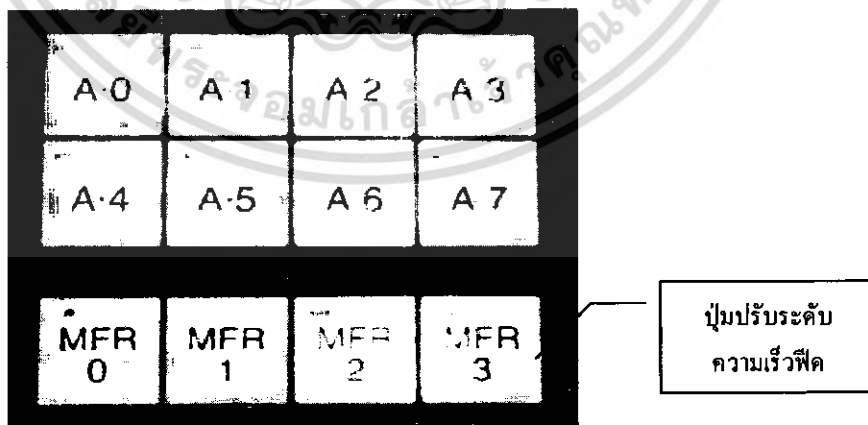


รูปที่ ผก 7 หน้าจอแสดงคำสั่งให้กดปุ่ม ENT



รูปที่ ผก 8 ปุ่มควบคุมค่าต่างๆ ของเครื่องอีดีเอ็ม

เมื่อจุดหัวจับอิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนหาลิคมิตสวิตช์จนเสร็จเรียบร้อยแล้ว สถานะของเครื่องในขณะนี้สามารถบังคับจุดหัวจับอิเล็กทรอนิกส์ไปตามแนวแกน XYZ ได้อย่างอิสระ โดยยกการควบคุมบังคับการเคลื่อนที่ของจุดหัวจับอิเล็กทรอนิกส์ ดังรูปที่ ผก 8 และสามารถเลือกความเร็วฟีด (Feed) ในการเคลื่อนที่ของจุดหัวจับอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะมีอยู่ 4 ระดับ ดังรูปที่ ผก 9



รูปที่ ผก 9 ปุ่มควบคุมความเร็วฟีด (Feed)

2. การติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์และชิ้นงาน

ทำการเคลื่อนชุดหัวจับอิเล็กทรอนิกส์มายังจุดที่พร้อมจะติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์

2.1 ทำการติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์และชิ้นงาน ดังรูปที่ ผก 10 ในส่วนของท่อฉีดสารไดอิเล็กทริก เพื่อทำการฉีดไล่เศษโลหะในระหว่างทำการสปาร์ก จะต้องเช็คตำแหน่งให้มีอัตราการฉีดไล่เศษโลหะคงที่ในทุก ๆ ครั้งของการทดลอง (กรณีที่ไม่สนใจปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอัตราการฉีดไล่เศษโลหะที่เกิดขึ้นจากการสปาร์ก)

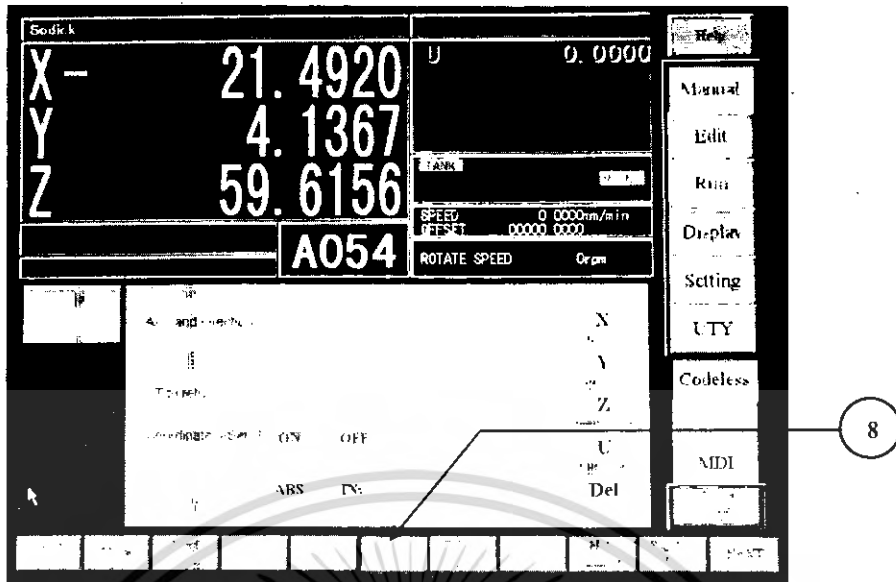


รูปที่ ผก 10 การติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์และชิ้นงาน

3. การเช็คอัพเครื่อง การป้อนโค้ดต่าง ๆ และการเริ่มทำการสปาร์ก

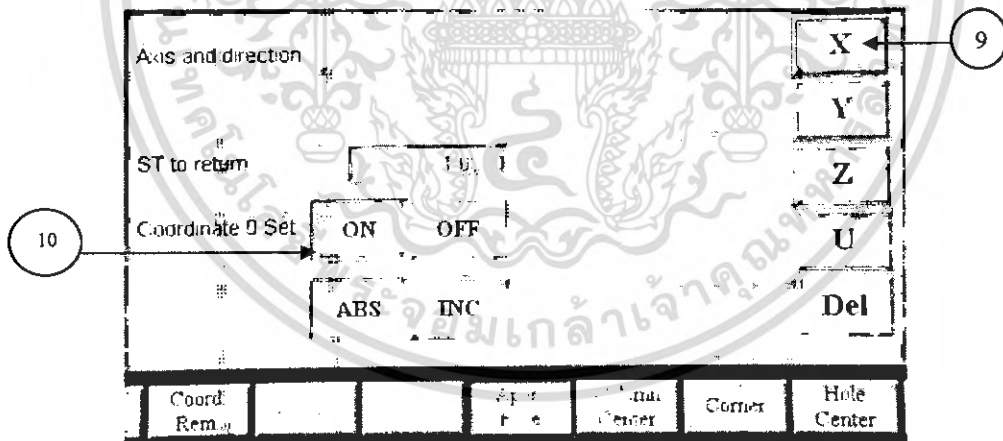
การเลือกฟังก์ชันต่าง ๆ จะเป็นแบบระบบสัมผัสหน้าจอ โดยจะแสดงการเช็คอัพเครื่องและการป้อนโค้ดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

3.1 ทำการตั้งค่าศูนย์ชิ้นงานในระบบพิกัดแกน XYZ ทั้ง 3 แกน ซึ่งจะป้อนค่าอ้างอิงในการเดินของแท่งอิเล็กทรอนิกส์ ผู้ทำการทดลองจะต้องกำหนดตำแหน่งจุดเริ่มต้น (จุด Origin) เองว่าจะเลือกตำแหน่งใด จากนั้นเลือกกดปุ่ม Appr Face หมายเลข 8 ดังรูปที่ ผก 11



รูปที่ ผก 11 หน้าจอแสดงการเข้าฟังก์ชัน Appr Face

จากนั้นเคลื่อนอิเล็กโทรดเข้าใกล้ชิ้นงาน (ต้องไม่ชนชิ้นงาน) ในแนวแกน X ในฟังก์ชันของ Appr Face ให้กดเลือกแกน X หมายเลข 9 เพื่อป้องกันทิศทางการเดินเข้าหาชิ้นงาน แล้วกำหนดการเคลื่อนที่เป็นแบบ ABS (Absolute) ตามด้วยการกดเลือก ON หมายเลข 10 ดังรูปที่ ผก 12 จากนั้นสั่งให้เริ่มทำการเซตค่าศูนย์ในแนวแกน X โดยการกดปุ่ม ENT หมายเลข 7 ดังรูป ผก 8 ส่วนการเซตค่าศูนย์ชิ้นงานตามแนวแกน YZ ดำเนินตามวิธีการเดียวกัน

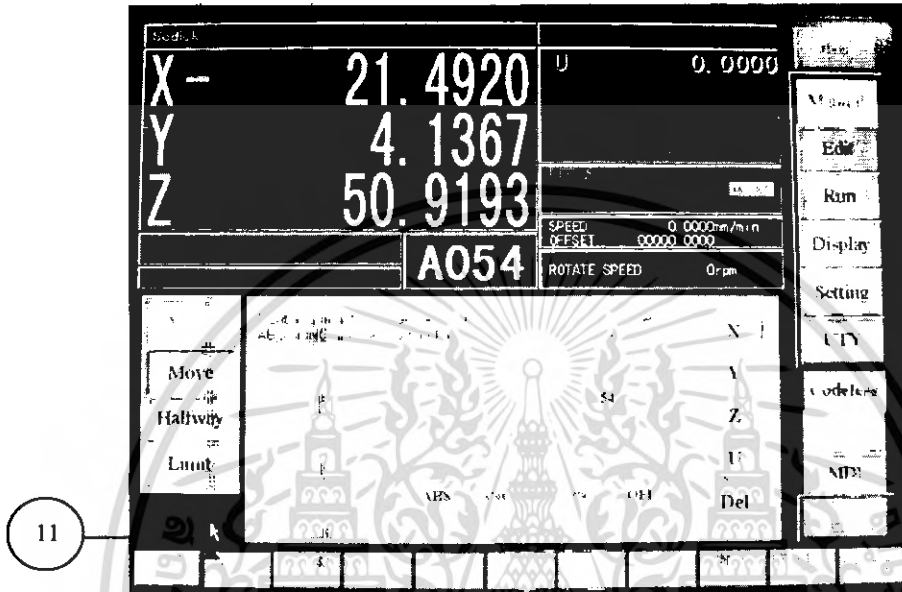


รูปที่ ผก 12 หน้าจอแสดงฟังก์ชัน Appr Face

หมายเหตุ : กรณีอิเล็กโทรดชนกับชิ้นงานจะมีสัญญาณเตือนดังขึ้น และอิเล็กโทรดจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ แก้ไขโดยการกดปุ่ม ACK แล้วกด ปุ่ม ST ค้างไว้ จากนั้นกดปุ่มบังคับทิศทางให้อิเล็กโทรดออกห่างจากชิ้นงาน ซึ่งคำสั่งของปุ่มต่างๆ เหล่านี้แสดงในรูปที่ ผก 8

ในกรณีต้องการยกเลิกคำสั่งใด ๆ ที่กระทำอยู่ล่าสุด ให้กดปุ่ม HALT OFF และ ACK ตามลำดับ ซึ่งปุ่มต่าง ๆ เหล่านี้แสดงไว้ในรูปที่ ผก 8

3.2 เมื่อทำการเช็คค่าศูนย์ชิ้นงานครบทั้ง 3 แกน แล้วสามารถเคลื่อนอเล็กโทรดไปยังตำแหน่งเริ่มต้นที่ต้องการจะสปาร์กชิ้นงานได้โดยฟังก์ชัน Move ให้กดฟังก์ชัน Move หมายเลข 11 ดังรูปที่ ผก 13 จากนั้นป้อนพิกัด XYZ ตามที่ต้องการ โดยอ้างอิงจากจุดเริ่มต้นแบบสัมบูรณ์ (Absolute)



รูปที่ ผก 13 หน้าจอแสดงฟังก์ชัน Move

3.2 เขียน G-Code โดยการเข้าแถบเมนู Edit ด้านขวาของจอ หมายเลข 12 ดังรูปที่ ผก 14 การเขียน G-Code ในการสปาร์กมี 2 วิธีที่สำคัญคือ

3.2.1 ทำการสปาร์กชิ้นงาน โดยการกำหนดระยะเวลาสิ้นสุดการสปาร์กในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ สามารถเขียน G-Code โดยการป้อน G85 Z3000 หมายถึง ทำการสปาร์กตัดชิ้นงาน ตามแนวแกน Z เป็นเวลา 30 นาที

ตัวอย่าง G-Code ในการทดลอง

```
G00 Z10000
G00 X150000 Y150000
G85 Z3000
G01 Z-280000 C100
G00 Z200000
G00 X0000 Y0000
```

ในการกำหนดเวลาในการตัดชิ้นงานนั้น จะต้องใช้ร่วมกับ G01 เป็นโค้ดที่ใช้ในการตัด จากตัวอย่าง G01 Z-280000 หมายถึงการตัดชิ้นงานในแนวแกน Z ไปในทิศทางลบ เป็นระยะทาง 28 มิลลิเมตร การกำหนดระยะนี้

จะต้องกำหนดให้ใกล้เคียงกับความสูงของชิ้นงาน เพื่อป้องกันการตัดโค่นแท่นรองชิ้นงาน และการสิ้นสุดการตัดจะต้องไม่จบที่ ใต้ G01 นั้นหมายถึง ระยะเวลาในการตัดจะไม่ครบ 30 นาที ส่วน G00 เป็นการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วโดยไม่ตัดเนื้อชิ้นงาน

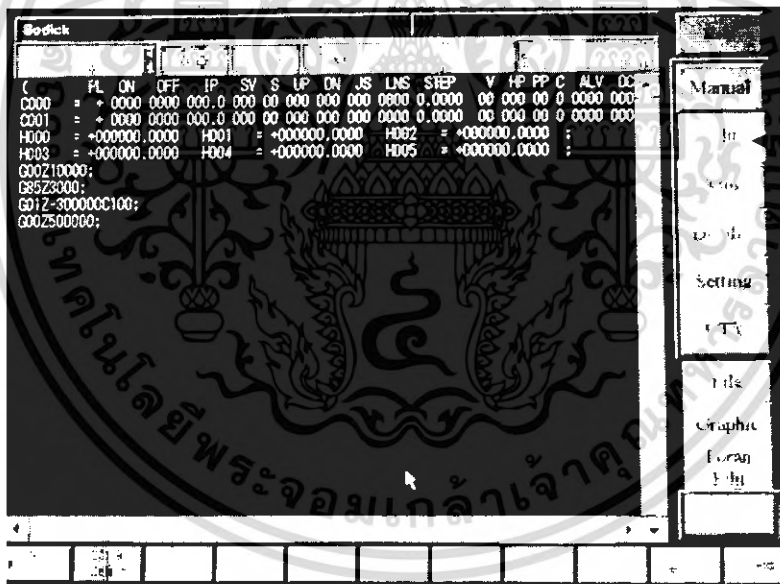
หมายเหตุ : การใช้โค้ด G85 ร่วมกับโค้ด G01 G02 G03 เครื่องจะทำการหยุดตัดงานเมื่อทำงานครบข้อกำหนดของโค้ดใดโค้ดหนึ่งก่อน

3.2.3 กำหนดการตัดชิ้นงานโดยกำหนดเป็นความลึกเป็นค่าใด ๆ จะไม่มีเวลาในการตัดเข้ามาเกี่ยวข้อง การสิ้นสุดการตัดชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับระยะความลึกที่กำหนด โค้ดที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน คือ G01

ตัวอย่าง G-Code ในการทดลอง

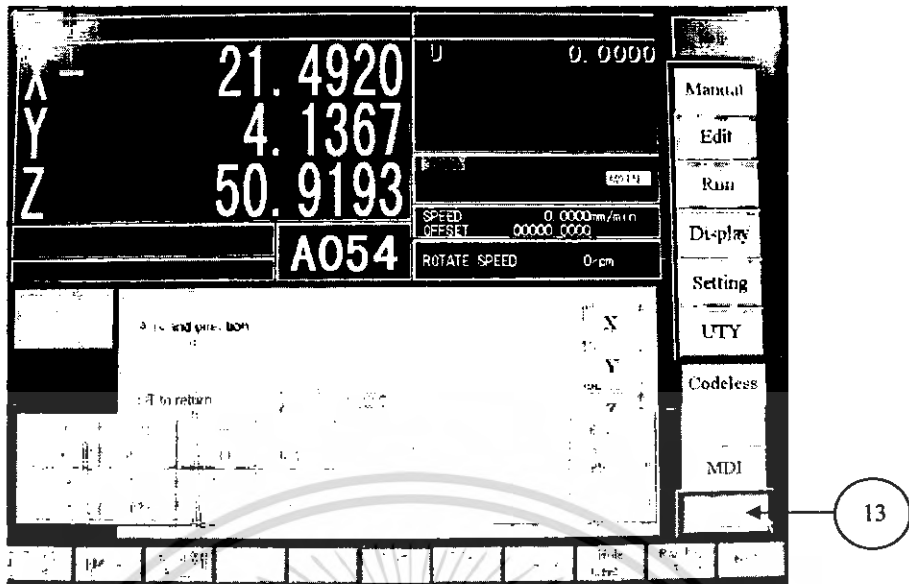
```
G00 Z10000
G00 X150000 Y150000
G01 Z-280000 C100
G00 Z200000
G00 X0000 Y0000
```

จากตัวอย่าง ในการสปาร์กจะสิ้นสุดการตัดก็ต่อเมื่อ ทำการตัดในแนวแกน Z ไปในทิศทางลบจนถึงระยะ -28 มิลลิเมตร ก็จะหยุดทำการสปาร์ก



รูปที่ ผก 14 หน้าจอสำหรับเขียน G-Code ในฟังก์ชัน Edit

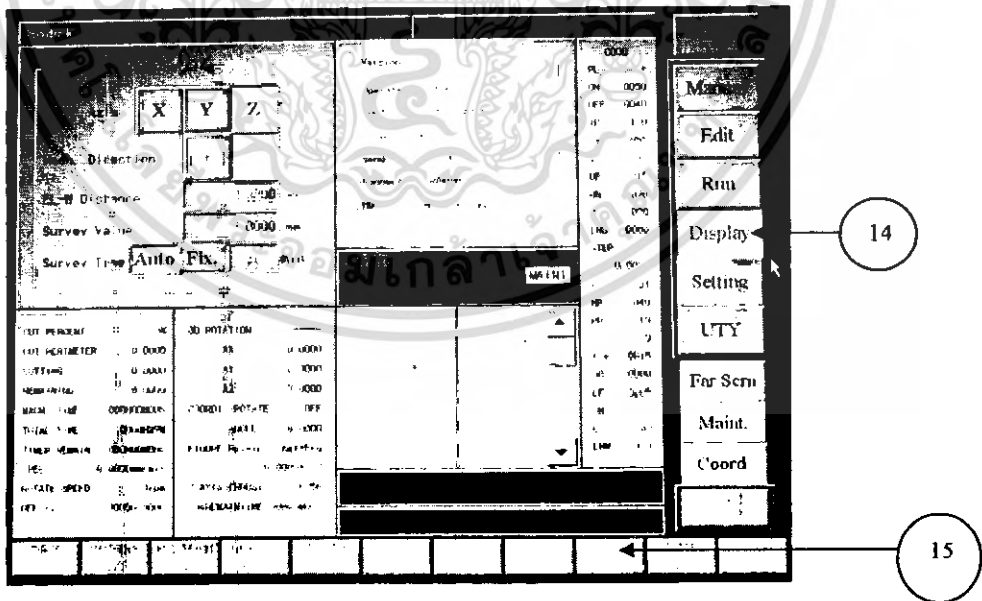
3.3 กำหนดเงื่อนไข C100 (Condition C100) ในการตัดชิ้นงาน ซึ่งเป็นเงื่อนไขในการตัดระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นทองแดงกับชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้า (กรณีถ้าเป็นเงื่อนไขอื่นจะต้องพิจารณาจากคู่มือการใช้เครื่องอีซีเอ็ม Section 11: Machining Condition Table) ในการป้อนเงื่อนไขในการตัด กดเลือก Cond C000 หมายเลข 13 ดังรูปที่ ผก 15 จากนั้นป้อนเงื่อนไขในการตัดที่ต้องการ



รูปที่ ผก 15 หน้าจอแสดงเงื่อนไขของการตัด

3.4 เข้าแถบเมนู Run เพื่อทำการทดสอบ G-Code และเงื่อนไขในการตัด เมื่อทดสอบโปรแกรมผ่านแล้ว กดเลือก START G30 หมายเลข 15 ดังรูปที่ ผก 16 ค่อยไปกดปุ่ม ENT หมายเลข 7 ดังรูปที่ ผก 8 เครื่องก็จะเริ่มทำงาน สปร้าร์กขึ้นงานตามเงื่อนไขที่กำหนด (กรณีที่ตั้งค้ไม่ยกขึ้น ให้สังเกตแรงกดความดันจะต้องไม่ต่ำกว่า 0.2 MPa)

ขณะที่การสปรร้าร์กขึ้นงานผู้ทดลองสามารถพิจารณาข้อมูลในการตัดได้โดยการ กดเลือก Display ในแถบเมนูด้านขวาของจอ ในหมายเลข 14 ดังรูปที่ ผก16

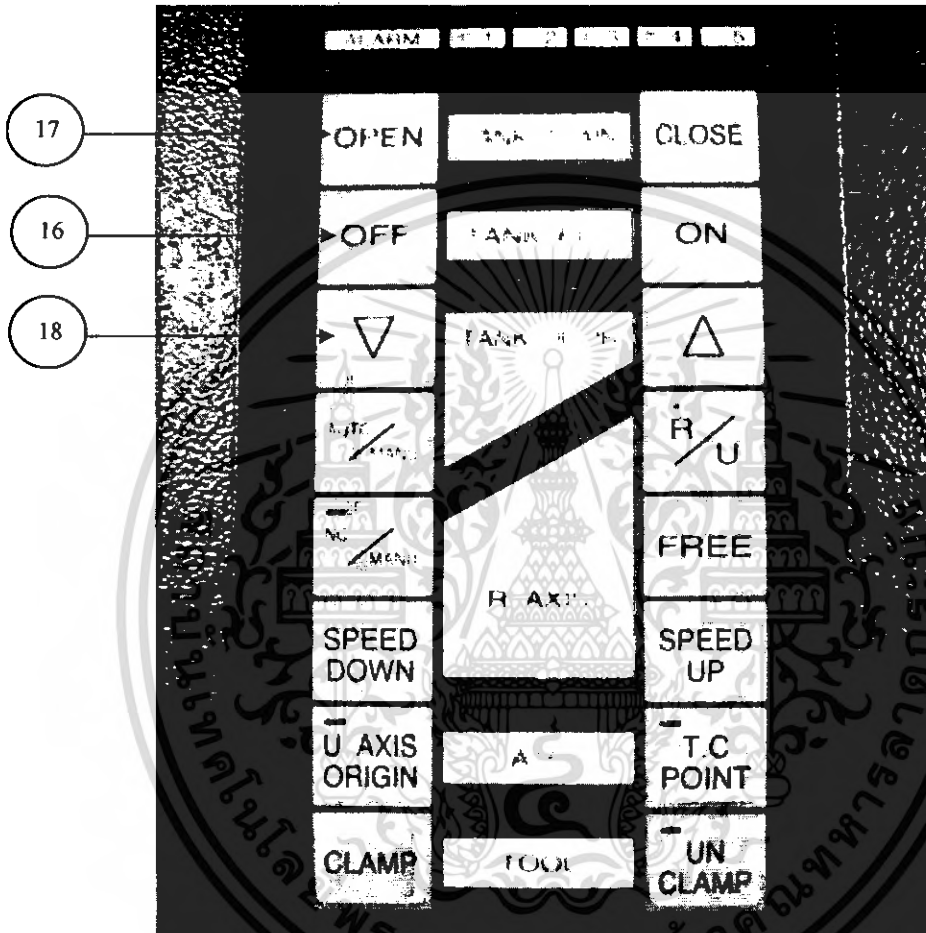


รูปที่ ผก 16 หน้าจอแสดงข้อมูลของการตัด

4. การถอดคีย์โทรคและชิ้นงาน

ก่อนจะถอดคีย์โทรคและชิ้นงานออก จะต้องทำการระบายสาร ไล่อิเล็กทริกออกจากแท่งคีย์ให้หมดก่อน

4.1 กดปุ่ม OFF TANK FILL หมายเลข 16 ตามด้วย OPEN TANK DRAIN หมายเลข 17 และเมื่อสาร ไล่อิเล็กทริกลดระดับจนแห้งกดปุ่ม TANK DOOR หมายเลข 18 ในรูปที่ ผก 17 เพื่อเอาแท่งคีย์ลง



รูปที่ ผก 17 แผงควบคุมแท่งคีย์ด้านหน้าเครื่อง

4.2 ทำการถอดคีย์โทรคและชิ้นงานออกจากคั่วจับยึด

5. การปิดเครื่อง

ทำการปิดไล่อ้อนกลับโดยมีขั้นตอนดังนี้

5.1 ทำการปิดระบบแมคคานิค โดยการกดปุ่ม POWER OFF ดังรูปที่ ผก 5

- 5.2 ปิดโปรแกรม โดยการกดปุ่ม SOURCE OFF ดังรูปที่ ผก 5
- 5.3 ทำการปิดสวิทช์ด้านหลังเครื่องฮีตปั๊ม หมายเลข 4 ดังรูปที่ ผก 4
- 5.4 ปิดสวิทช์เครื่องแปลงไฟฟ้า หมายเลข 2 ดังรูปที่ ผก 3
- 5.5 ปิดสวิทช์เบรกเกอร์ (Breaker) หมายเลข 1 ดังรูปที่ ผก 2
- 5.6 ทำความสะอาดเครื่องฮีตปั๊ม





ภาคผนวก ข

ผข 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INSPECTION CERTIFICATE

Messrs: NITETSU SHoji CO., LTD. (6EP210) (6EP211) (6EP216)
 Date: AUG., 29, 2006 Packing List No: R-52


Contract No: 17K-73908 Customer No: Condition: SPHEROIDIZED ANNEALED

Bundle No.	Type of Steel	Heat No.	Quantity			Length (M)	P' ce	Weight (KGS)	Body Hardness		
			Size (MM)	Weight (KGS)	PC					HB	
3-4	DC53	5962D	DIA 25	4.900-4.940	101	1,922	223				
5	DC53	2C333	DIA 26	4.940	38	787	229				
1	DC53	1C398	DIA 46	4.900-4.920	16	1,022	217				
Items	Chemical Composition										
	C	CR	NO	Mn	P	S	Si	Al	Ca	N	As
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Specification	100	100	100	100							
Heat No	5962D	07	814	191							
	2C333	99	821	193							
	1C398	96	818	192							
Mechanical Properties (Type of Specimen)											
Heat No	Yield Strength	Tensile Strength	Elongation of Specimen	Reduction of Area	Hardness	Impact Value					
						kgf/cm ²	kgf/cm ²				

It is hereby certified that the above results are true and correct in every detail.

Kawaasaki Plant. Chief of Quality Assurance Section
Daido Steel Co. Ltd. T. Sugimoto

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



HITACHI
Hitachi Metals, Ltd.

Head Office
1-2-2-chome, Maruouchi
Chiyodaku, Tokyo, Japan

TEST CERTIFICATE

Month: 1 Day: 31 Year: 00

Report No. Y77965 Date _____

Material JIS SKD 11

Contractor _____ Contract No. AS-71291

Production No. _____

Item	Case No.	Size (mm)	Number of Piece	Weight (kg)	Charge No.	Chemical Composition (%)						Remarks	
						C	Si	Mn	P	S	Cr		W
1		26	9	440		1.49	0.28	0.39	0.017	0.009	12.05	0.80	
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													

Condition Hot Rolled & Annealed

Spec.	Unit	Hardening Test		Tempered		Decarburization Test	Micro Structure Test
		Temperature (°C)	Hardness (HRC)	Temperature (°C)	Hardness (HRC)		
1	235	1000 AIR	65.7	150 AIR	60	Good	Good
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

Signature: T. Kishida
 T. Kishida
 Manager of Quality Control Section,
 Yasugi Works, Hitachi Metals, Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



JAMES COPPELL LEE

INSPECTION REPORT

CUSTOMER:

ORDER No	ALLOY No	DESCRIPTION	SIZE	QTY
IPOO-16007	J472 Cr, Zr, Cu	Extruded and Drawn Section	5/8" DIA	2000 KGS
			3/4" DIA	1000 KGS
			1" DIA	1000 KGS

MECHANICAL PROPERTIES

SPEC:	CONDUCTIVITY I.A.C.S.	HARDNESS H.R.B.
5/8" DIA	84 - 88 I.A.C.S.	79 - 84 HRB
3/4" DIA	84 - 88 I.A.C.S.	79 - 82 HRB
1" DIA	84 - 88 I.A.C.S.	79 - 81 HRB

CHEMICAL COMPOSITION

SPEC:	COPPER Balance	CHROMIUM Minimum .5	ZIRCONIUM Minimum 0.03
5/8" DIA	Balance	.68 - .94	.031 - .039
3/4" DIA	Balance	.70 - .91	.031 - .041
1" DIA	Balance	.64 - .98	.030 - .037

Paul McMaster.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ORIENTAL COPPER CO., LTD.

OFFICE : 2/F Fl., Bangkok Insurance Bldg., Building
215 Srinakharinwirot Road, Thungmahavej, Sathaburi
Bangkok 10120, Thailand
TEL : +66 (0) 2246-3799, 2246-6156, 2246-6812
FAX : +66 (0) 2256-3144

F.V. OFFICE : 7/F, 655 M.I.A. Building, Rajabhat Rajabhat
Bangkok and Sub-Branch, Amphur Chong
Chaburi 30000, Thailand
TEL : +66 (0) 744-544 (Area IP) Ext-1
FAX : (66) 38, 213-256
Web Site : www.orientalcopper.com

Certificate Number : OC-KC-0657/06
Customer Name : NGECK SENG CHIANG METAL CO. LTD.
Order Number : CY-3604-025
Date : 11 May 2006


L/C Number :
Specification : JIS H3140 : 1992 C1100 BB HALF HARD TEMPER
Product Description : COPPER BUSBARS
Product Traceability Code : P.I. NO. ZY-0604-025

Size : Thickness x Width x Length
Weight : lbs
Conductivity : % IACS
Copper : %
Tensile Strength : MPa
Elongation : %
Dimension : Check

Size	Weight	Conductivity	Copper	Tensile Strength	Elongation	Dimension
Thickness x Width x Length	lbs	% IACS	%	MPa	%	Check
1/8" x 1/2" SE x 5000 mm	468.0	100.9	99.98 Min	302.4	15.2	PASSED
3/16" x 1/2" SE x 5000 mm	548.1	100.7	99.98 Min	309.4	15.4	PASSED
1/4" x 3/4" SE x 5000 mm	523.8	100.9	99.98 Min	304.9	16.2	PASSED
1/4" x 2" SE x 5000 mm	1,152.0	100.3	99.98 Min	305.2	21.5	PASSED
1/4" x 2 1/2" SE x 5000 mm	486.0	100.4	99.98 Min	301.8	25.9	PASSED
1/4" x 3" SE x 5000 mm	496.8	100.2	99.98 Min	297.8	16.4	PASSED
3/8" x 1" SE x 5000 mm	526.4	100.9	99.98 Min	292.1	26.4	PASSED
3/8" x 2" SE x 5000 mm	950.4	100.3	99.98 Min	287.3	34.4	PASSED
6 mm x 100 mm SE x 5000 mm	1,072.3	100.8	99.98 Min	304.2	17.6	PASSED

We certify that the materials described herein have been
manufactured, examined and tested in accordance with
our quality assurance procedure to JIS H3140.

Prepared by : 
Quality Assurance

Approved by : 
Plant Manager

FM-QA-037 : 170 : 15-11-02